



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

**STANOVENÍ Q/H CHARAKTERISTIKY ATYPICKÉHO
MĚRNÉHO ŽLABU**

DETERMINATION OF Q / H CHARACTERISTIC OF ATYPICAL MEASURING FLUME

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Boháč

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL ŽOUŽELA, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Daniel Boháč
Název	Stanovení Q/H charakteristiky atypického měrného žlabu
Vedoucí práce	Ing. Michal Žoužela, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2018
Datum odevzdání	24. 5. 2019

V Brně dne 30. 11. 2018

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] Žoužela, M.: Návrh a fyzikální modelový výzkum měrného žlabu určeného pro stanovení minimálních zůstatkových průtoků v profilu jezu Jiřinka I na řece Bečvě v říčním km 59,7. Výzkumná zpráva, LVV – FAST – VUT v Brně, 2017
- [2] Žoužela, M.: Stanovení Q/H charakteristiky měrného žlabu Ž-PVK-1. Výzkumná zpráva, LVV – FAST – VUT v Brně, 2017
- [3] Žoužela, M. Fejfarová, M.: Stanovení Q/H charakteristiky měrného objektu na přítoku do ČOV Modřice v podmínkách ovlivnění proudění úrovní hladiny dolní vody. Výzkumná zpráva, LVV – FAST – VUT v Brně, 2010

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Pro měření průtoků se používá celá řada vzdouvacích objektů typu žlab. Ty lze využít i na řekách pro měření minimálních zůstatkových průtoků tak, že se stanou součástí konstrukce pevného jezu. V rámci zpracování bakalářské práce bude provedena rešerše dostupných standardně používaných měrných žlabů, následně bude navržen tvar a rozměry atypického měrného žlabu a provedena jeho kalibrace v měrné trati hydraulické laboratoře.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. Michal Žoužela, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá měřením průtoků v profilech s volnou hladinou se zaměřením na měřicí systémy využívající principu Q/H charakteristiky. Součástí práce je popis standartně používaných měrných vzdouvacích objektů typu přeliv a žlab. Hlavním úkolem práce je konkrétní návrh atypického měrného žlabu. Tento žlab se stane součástí konstrukce pevného jezu a bude zajišťovat měření minimálních zůstatkových průtoků. V prostorách Laboratoře vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně byl autorem proveden rozsáhlý modelový výzkum, při kterém byly zkoumány různé varianty tvarů a rozměrů tohoto žlabu. Práce obsahuje zpracování těchto měření a jejich vyhodnocení. Výsledkem práce je výběr vhodného variantního řešení atypického měrného žlabu a stanovení jeho Q/H charakteristiky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Q/H charakteristika, měrný žlab, měrný přeliv, atypický, měření v profilech s volnou hladinou

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with streamflow measurement with focus on measuring systems using the Q/H characteristic. The thesis includes the description of the commonly used measuring weirs and flumes. The main task of this thesis is a specific project of atypical measuring flume. This flume will become a part of a rigid weir and will measure the minimum residual flow rates. In the Laboratory of Water Management Research of the Institute of Water Structures of the Faculty of Civil Engineering of the Brno University of Technology, the author has done extensive model research. In this research, various variants of the shapes and dimensions of the atypical measuring flume were analysed. The thesis also includes data processing of the said research and evaluation. The result of this work is the choice of the optimal variant of shapes and dimensions of atypical measuring flume and to determine its Q/H characteristic.

KEYWORDS

Q/H characteristic, measuring flume, measuring weir, atypical, streamflow measurement

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Daniel Boháč *Stanovení Q/H charakteristiky atypického měrného žlabu*. Brno, 2019. 61 s., 10 s. příl.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Michal Žoužela, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Stanovení Q/H charakteristiky atypického měrného žlabu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 24. 5. 2019

Daniel Boháč
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Stanovení Q/H charakteristiky atypického měrného žlabu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2019

Daniel Boháč
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Žouželovi, Ph.D. za odborné rady, podnětné a mnohdy vtipné připomínky a trpělivost při konzultacích, což mi výrazně pomohlo při vypracování bakalářské práce. Současně děkuji i společnosti KOCMAN envimonitoring s.r.o. za poskytnutí geodetických a výkresových podkladů.

OBSAH

1	Úvod.....	- 9 -
2	Proudění kapalin v otevřených korytech.....	- 10 -
2.1	Laminární a turbulentní proudění	- 10 -
2.2	Druhy proudění z hlediska energie	- 11 -
2.2.1	Proudění bystrinné, kritické a říční	- 12 -
2.2.2	Přechod mezi jednotlivými druhy proudění	- 13 -
3	Měření průtoků v profilech s volnou hladinou.....	- 15 -
3.1	Měrné přelivy.....	- 16 -
3.1.1	Ostrohranné přelivy.....	- 18 -
3.2	Měrné žlaby	- 22 -
3.2.1	Parshallovy žlaby	- 23 -
3.2.2	Žlaby typu Saniiri.....	- 24 -
3.2.3	Žlaby typu Venturi	- 25 -
4	Cíle práce a motivace	- 26 -
5	Experimentální část.....	- 28 -
5.1	Měřicí trať a technika.....	- 28 -
5.2	Charakteristika zkoumaného atypického žlabu	- 32 -
5.2.1	Charakteristika jednotlivých variant vzdouvacích prvků.....	- 34 -
5.2.2	Charakteristika jednotlivých variant zavazovacích pilířů	- 37 -
5.3	Popis experimentu.....	- 38 -
5.4	Postup měření	- 39 -
5.5	Zpracování naměřených dat.....	- 40 -
5.6	Proložení bodů Q/H charakteristiky spojnicí trendu.....	- 43 -
5.7	Výsledky měření	- 46 -
5.7.1	Výsledky experimentálních prací na modelu M 5,5	- 46 -
5.7.2	Výsledky experimentálních prací na modelu M 8,5	- 50 -
5.8	Shrnutí a diskuze dosažených výsledků.....	- 53 -
6	Doporučení pro další výzkum	- 55 -
7	Závěr.....	- 56 -
8	Literatura	- 57 -
9	Seznam zkratk a symbolů.....	- 59 -
10	Seznam příloh.....	- 61 -

1 ÚVOD

V současné době lze v přírodě pozorovat klimatické změny, které mají mimo jiné za následek změnu časového rozvržení srážek. Krátkodobé srážky mívají větší intenzitu, na druhou stranu se prodlužují období sucha, při kterých je v půdě a korytech řek nedostatek vody. Jelikož se pro potřeby společnosti na řekách vyskytují odběrné objekty, které mohou sloužit například k odběru vody pro technologické účely, může být ohroženo zajištění minimálního zůstatkového průtoku poproudě za nimi.

Tento průtok však nesmí být odběry omezen. Z tohoto důvodu je třeba zajištění správného měření minimálních zůstatkových průtoků, což může být realizováno například i budováním měrných vzdouvacích objektů typu žlab v profilech stávajících jezových stupňů. Další možností je instalace měrných vzdouvacích objektů typu přeliv, které jsou z důvodu jejich obecné rozšířenosti podrobně popsány v teoretické části. Oba výše uvedené měřicí systémy fungují na principu Q/H charakteristiky.

V inženýrské praxi může dojít k situacím, při kterých zabrání okrajové podmínky a požadavky objednatele použití návrhu standardních „normalizovaných“ měřicích systémů. Tuto situaci lze vyřešit návrhem atypického měrného žlabu, který daným podmínkám vyhoví. Aby bylo možno návrh uskutečnit, je nutné provést modelový výzkum, kterým lze pro atypický žlab určit jednoznačnou Q/H charakteristiku.

Tato bakalářská práce se zabývá měřením a stanovením Q/H charakteristik celkem pěti zkoumaných variant atypického měrného žlabu v prostorách Laboratoře vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Tento měřicí systém bude součástí konstrukce pevného jezu a jeho účelem bude právě měření minimálních zůstatkových průtoků.

Práce je členěna do deseti kapitol. V první části se čtenář seznámí s teoretickými poznatky o proudění a měření průtoků v profilech s volnou hladinou. Tyto informace byly čerpány z odborné literatury a jsou náležitě citovány. Následuje experimentální část, kde je popsána problematika konkrétního návrhu atypického měrného žlabu, včetně stanovení jeho Q/H charakteristiky. Součástí experimentální části je zpracování naměřených dat a vyhodnocení výsledků. Závěrem jsou shrnuty dosažené výsledky a doporučen navazující výzkum. Na konci této práce se nachází přílohová část s grafickými výstupy.

2 PROUDĚNÍ KAPALIN V OTEVŘENÝCH KORYTECH

V následující kapitole se čtenář seznámí s prouděním kapalin v otevřených korytech. Bude popsáno, jaké proudové podmínky mohou nastat v otevřených korytech. Znalost proudových podmínek je důležitá při návrhu měřicích zařízení, jimiž se tato práce zabývá. Budou charakterizovány jednotlivé druhy proudění a přechody mezi nimi.

Proudění kapalin je pohyb určitého objemu látky, která není pevná nebo plynná, je téměř nestlačitelná a neklade výrazný odpor při změně tvaru. Při proudění převažuje pohyb v jednom směru. [1]

V otevřených kanálech je proudění klasifikováno mnoha způsoby. Pokud se jako kritérium použije čas, dělí se proudění na ustálené a neustálené. Je-li průtok konstantní s ohledem na čas, jedná se o proudění ustálené, pokud se průtok v čase mění, proudění je neustálené. Ustálené proudění se dále dělí dle kritéria prostoru na rovnoměrné, kdy jsou v čase konstantní všechny charakteristiky včetně tvaru koryta, drsnosti a sklonu dna, respektive čáry energie, a proudění nerovnoměrné. Ustálené nerovnoměrné proudění má v závislosti na čase konstantní průtok, ale sklon čáry energie se po délce koryta mění. [2] [3]

V přírodě je v zásadě možné vidět pouze neustálený průtok, avšak pro kratší časový úsek ho lze považovat za ustálený. Proudění rovnoměrné se v přírodě s výjimkou umělých kanálů v podstatě nenachází, ale slouží jako zjednodušený často používaný výpočetní model. [3]

2.1 Laminární a turbulentní proudění

Struktura pohybu jednotlivých částic ovlivňuje chování hydraulického systému průtoku. Reynolds svými experimenty dokázal existenci dvou odlišných režimů pohybu. V případě, že částice kapaliny procházejí v plynulých, souběžných drahách a nemísí se mezi sebou, jedná se o proudění laminární. Tomuto proudění se také říká vrstevnaté, z lat. lamina = vrstva. V turbulentním režimu proudění dochází k vzájemnému mísení částic, jejich pohybu v nepravidelných drahách a proměnlivosti složek rychlosti a tlaku. [3] [4]

Rozmezí režimu proudění charakterizuje bezrozměrná veličina – Reynoldsovo číslo:

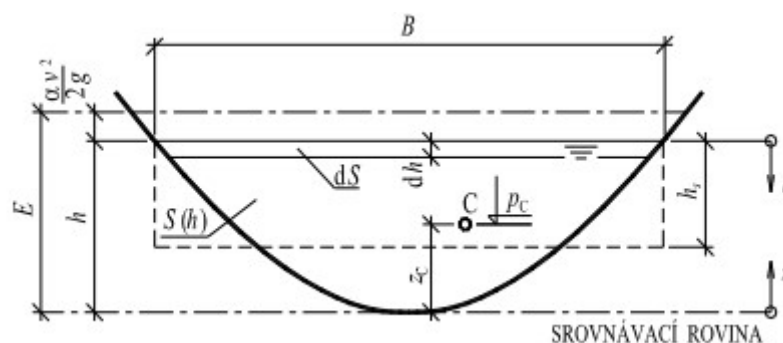
$$Re = \frac{v R}{\nu}, \quad (2.1)$$

kde v značí střední rychlost proudění, R je hydraulický poloměr, který se u otevřených koryt bere jako charakteristický rozměr a ν značí kinematickou viskozitu kapaliny. [3] [4]

Hranice laminárního proudění je podle pokusů pro všechny tekutiny stálá hodnota, která pro profily s volnou hladinou odpovídá $Re \approx 580$. Za laboratorních podmínek však může být laminární proudění udržováno i pro vyšší Reynoldsova čísla. Pohyb turbulentní nastane u koryt od $Re > 3450$. Mezi těmito dvěma hranicemi existuje přechodná oblast, kde mohou být oba typy pohybu. Laminární režim proudění v této oblasti může přejít při každém vnějším podnětu ihned v turbulentní. [2] [3] [4]

2.2 Druhy proudění z hlediska energie

Z energetického hlediska existuje několik režimů proudění v profilech s volnou hladinou. Jednotlivé režimy mají různé vlastnosti a je nutné je rozlišovat při výpočtech průběhů hladin. [3]



Obr. 2.1 Energetická výška průřezu [4]

V příčném profilu s volnou hladinou a srovnávací rovinou umístěnou ve spodním bodě průřezu je energetická výška pro určitý bod vyjádřena následovně:

$$E_1 = h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g}, \quad (2.2)$$

kde h_1 značí výšku bodu nad nejnižším místem průřezu, p_1 tlak nad tímto bodem a u_1 je bodová rychlost. Pro celý průřez se nahradí bodová rychlost u průřezovou rychlostí v , a zavádí se substituce $h_1 + \frac{p_1}{\rho g} = y$. Měrná energie průřezu dostává tvar:

$$E = y + \frac{\alpha v^2}{2g} = y + \frac{\alpha Q^2}{2g S^2}, \quad (2.3)$$

kde y značí úroveň hladiny nad nejnižším bodem průřezu, α je Coriolisovo číslo vyjadřující nerovnoměrné rozdělení rychlosti, Q je průtok a S k němu vztažená plocha. [3] [5]

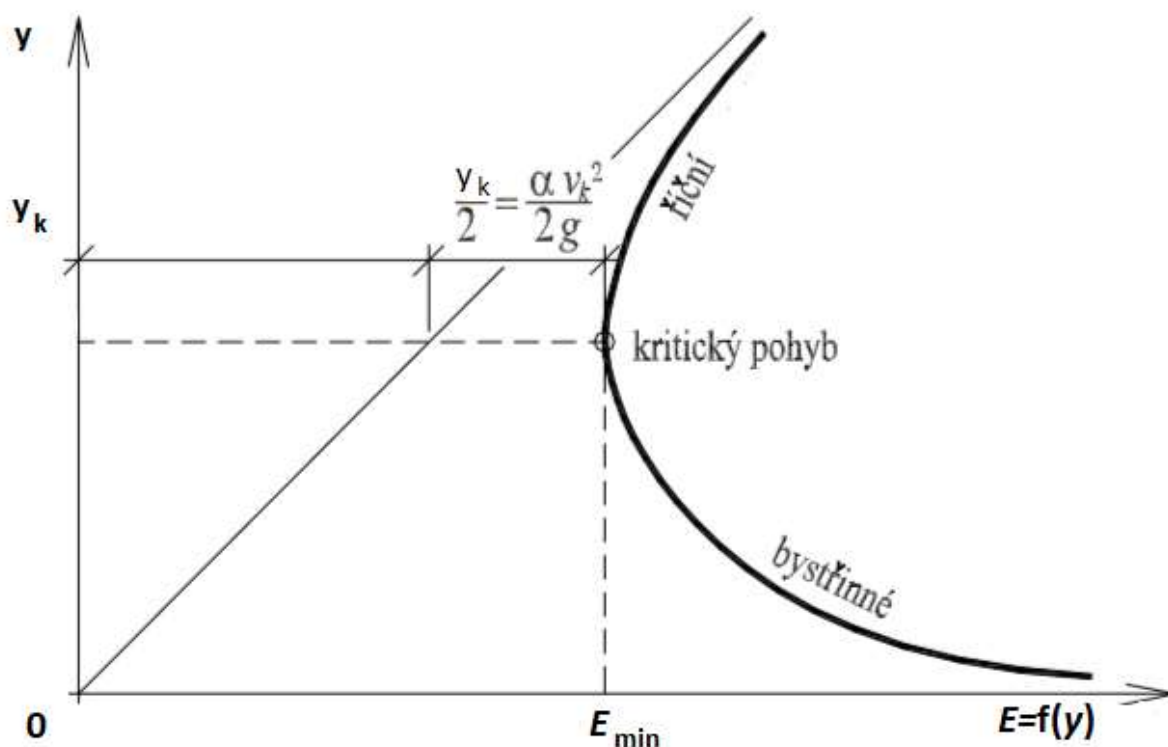
2.2.1 Proudění bystřinné, kritické a říční

Pro určitý konstantní průtok Q existuje závislost $E = f(y)$, která je charakterizována pro každý průřez jedinečnou křivkou (Obr. 2.2.). Při grafické konstrukci této křivky se provede výpočet energetické výšky E pro různé hloubky y v množině kladných reálných čísel. Pokud se výška hladiny přibližuje nule, rapidně klesá i průtočná plocha. To má za následek zvyšování rychlosti, jelikož z rovnice kontinuity vyplývá:

$$Q = v S. \quad (2.4)$$

Energetická výška se v takovém případě blíží nekonečnu a křivka se limitně blíží k vodorovné ose, což lze vidět na Obr. 2.2. [3] [4]

Při zvyšování výšky hladiny y k nekonečnu naopak rychlost nezbytná k převedení daného průtoku klesá k nule. Energetická výška E se znovu blíží k nekonečnu, ale křivka se v tomto případě blíží limitně k přímce, která pólí osy y a E . [4]



Obr. 2.2 Měrná energie profilu [4]

Místu, kde má křivka minimum energie E_{MIN} , odpovídá určitá hloubka y_k . Tato hloubka se nazývá kritická hloubka a je důležitá z mnoha hledisek. Tvoří rozhraní mezi prouděním bystřinným a říčním a nastává při ní tzv. kritické proudění. Kromě fyzikálního hlediska je tento bod křivky důležitý i matematicky, jelikož pro převedení daného konstantního průtoku je měrná energie profilu minimální. [3] [4]

Říční proudění nastává, je-li úroveň hladiny výš, než je hodnota kritické hloubky v daném profilu, tedy $y > y_k$. Tomuto typu pohybu se též říká podkritické, jelikož je při něm velká hloubka a nižší rychlost, než je rychlost při kritickém proudění.

Bystřinné proudění vzniká, když je daný průtok převeden hloubkou menší, než je hloubka kritická, tedy $y < y_k$. Jedná se o režim pohybu s malou hloubkou a velkou rychlostí, tzv. nadkritický.

Kritické proudění tvoří rozhraní mezi oběma výše uvedenými typy pohybu. V otevřeném korytě se jedná o zvláštní druh pohybu, který nastane jen při určitých podmínkách. Tento režim se nezachová po celé délce kanálu. Může nastat na začátku strmého úseku, na výstupu z mírného kanálu a na úsecích, kde dochází ke změnám vlastností kanálu. Kritický pohyb má obecnou podmínku:

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{S_k^3}{B_k}, \quad (2.5)$$

kde S_k značí průtočnou plochu a B_k šířku koryta v hladině při kritickém proudění. Po dosazení za $Q = v_k S_k$, vyplývá specifická vlastnost kritického proudění, rychlostní výška při kritickém proudění je stejná, jako polovina kritické hloubky, [2] [3] [4] [5], tedy:

$$\frac{\alpha v_k^2}{2g} = \frac{S_k}{2B_k} = \frac{y_k}{2}. \quad (2.6)$$

Druh proudění lze stanovit také pomocí bezrozměrného Froudova čísla, jenž je definováno jako:

$$Fr = \frac{\alpha v^2}{g y_s}, \quad (2.7)$$

kde $y_s = \frac{S}{B}$, je tzv. střední hloubka profilu, přičemž S je průtočná plocha a B šířka v hladině. Proudění je označováno za podkritické, pokud $Fr < 1$, kritické pro $Fr = 1$ a nadkritické, je-li $Fr > 1$. [2] [4]

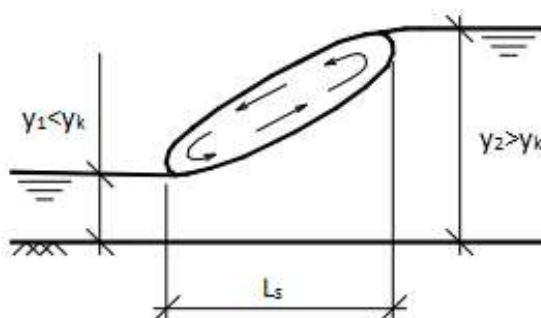
2.2.2 Přechod mezi jednotlivými druhy proudění

Tato podkapitola popisuje přechody mezi jednotlivými druhy proudění a uvádí, co může při jednotlivých přechodech nastat. Hlavním tématem bakalářské práce jsou totiž měřicí objekty v profilech s volnou hladinou, u kterých může být určitý přechod mezi druhy proudění vyžadován a jiný naopak nežádoucí. Tyto objekty jsou v práci popsány níže.

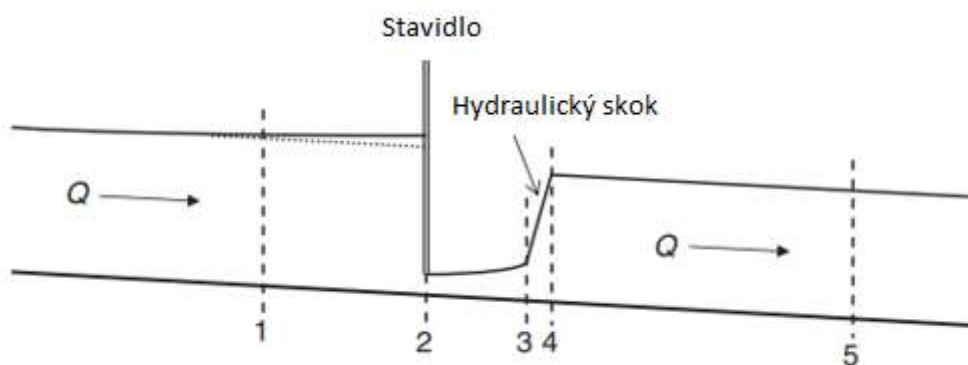
Proudění v profilech s volnou hladinou se může měnit z podkritického na nadkritické a naopak. Důvodem můžou být změny v charakteristikách kanálu nebo okrajových podmínek,

případně přítomnost hydraulických struktur. Přechod mezi jednotlivými typy proudění s volnou hladinou je odlišný. Zatímco přechod z říčního na bystrinné proudění je plynulý a obvykle proběhne hladce přes kritickou hloubku, tak změna z pohybu bystrinného do říčního nastává přes vodní skok. Ten se vyznačuje vysokou turbulencí, zvětšením hloubky vody a snížením rychlosti. Vodním skokem dochází k přeměně energie z kinetické na potenciální, čímž je tento hydraulický jev doprovázen ztrátami energie. [2] [4]

Existuje vodní skok s povrchovým, či dnovým režimem, který se dále dělí dle polohy k vodní stavbě na oddálený, přilehlý a vzdutý. V prostoru měřicích zařízení se lze setkat se dvěma typy vodních skoků. Prvním je vodní skok s dnovým režimem, přesněji prostý vodní skok charakterizovaný rozbíhajícím se proudem u dna (základní oblastí) a silně provzdušněným vodním válcem na povrchu (vnější oblastí). Druhým typem je vlnovitý vodní skok charakterizovaný řadou tlumených vln. Na Obr. 2.3 je vidět nadkritické proudění o výšce hladiny y_1 a přechod do podkritického proudění o výšce hladiny y_2 realizovaný vodním skokem. Tato situace může nastat např. při výtoku pod stavidlem a následným vzdutím vody vzdouvacím objektem, což lze vidět na Obr. 2.4. V praxi je pak třeba vypočítat, jestli se bude vodní skok realizovat v dostatečné vzdálenosti od měrného objektu. [4] [5] [6]



Obr. 2.3 Prostý vodní skok [4]



Obr. 2.4 Schéma změny proudění [2]

3 MĚŘENÍ PRŮTOKŮ V PROFILECH S VOLNOU HLADINOU

Ve vodním hospodářství může být monitoring průtoku v profilech s volnou hladinou klíčový. Znalost průtoku je důležitá při návrhu jezů, protipovodňových ochran, pro systém varování před povodněmi, při vypouštění vod z ČOV do povrchových vod či pro zajištění minimálních zůstatkových průtoků dle manipulačních řádů při odběrech vody v řekách.

Jednorázové, zpravidla kontrolní měření průtoků v profilech s volnou hladinou může být realizováno tzv. úředním měřením podle metrologického předpisu MP 010 (úřední měření průtoku vody v profilech s volnou hladinou) za použití různých metod. Jedná se o metodu rychlostního pole, objemovou metodu (kdy dochází k odebírání vody do odměrné nádoby), vážicí metodu (kdy je voda jímána do vážicího vaku) či přenosnou měřicí sestavu s průtokoměrem. Jednotlivé postupy mohou být upřesněny normami. [7]

Následující kapitola se však bude zabývat měřidly a měřicími systémy, které jsou trvale a napevno instalované v profilech s volnou hladinou, tedy zejména měřicími vzdouvacími objekty typu žlab a přeliv. [6]

Existují dva hlavní principy měření průtoku v profilech s volnou hladinou, na jejichž bázi fungují napevno instalované měřicí systémy. [8]

Prvním principem je využití jednoznačného funkčního vztahu mezi průtokem a výškou hladiny ($Q = f(h)$) protiproudě před vzdouvacím objektem typu žlab či přeliv. U žlabů se tato měrná křivka zpravidla značí Q/H charakteristika, u přelivů jako Q/h charakteristika. Tato zásada se opírá o přesně stanovenou závislost průtočného množství na změřených veličinách, kterými jsou buďto výška přepadového paprsku h , nebo hloubka proudu vody H v definovaném měrném profilu. Za předpokladu, že v měrném profilu nedojde ke změně geometrických okrajových podmínek proudění, tato závislost bude vždy stejná. Proudové poměry jsou stanoveny přítomností kritické hloubky, která byla vysvětlena v kapitole 2.2.1. [6]

Měřicí systémy využívající principu Q/h , či Q/H charakteristiky jsou tvořeny přítokovou částí, samotným vzdouvacím objektem typu žlab nebo přeliv (který vzdouvá hladinu horní vody), odpadním korytem, určitého počtu kontaktních či bezkontaktních automatických snímačů výšky hladiny a vyhodnocovacích jednotek s počítačem, případně pouze vyhodnocovací jednotky nebo počítače. Existuje také princip Q/H charakteristiky u výtokového otvoru. [6] [8]

Pro každý vzdouvací objekt je možné stanovit jednoznačnou Q/H , či Q/h charakteristiku. Matematicky lze funkční závislost průtoku Q na úrovni vzduté hladiny pro většinu vzdouvacích objektů nahradit tvary:

$$Q = A(H + D)^B + C \text{ pro } H \in (H_{min}; H_{max}), \text{ resp.} \quad (3.1)$$

$$Q = A(h + D)^B + C \text{ pro } h \in (h_{min}; h_{max}), \quad (3.2)$$

kde h je přepadová výška u vzdouvacích objektů typu přeliv, H je hloubka proudu u vzdouvacích objektů typu žlab, A, B, C, D jsou hodnoty koeficientů. Pro danou funkční závislost jsou zpravidla klíčové koeficienty A a B . Většinou lze danou funkční závislost vystihnout mocninnou funkcí, v některých případech (např. u atypických měrných žlabů) je vyhovující použít polynomickou funkci druhého nebo třetího řádu. [6]

Druhým principem měření průtoku v profilech s volnou hladinou je princip spojitosti proudu, dále jen kontinuitní princip. Ten vyjadřuje vztah mezi průřezovou rychlostí a plochou průtočného průřezu ve smyslu rovnice (2.4). Využití kontinuitního principu spočívá v profilech s volnou hladinou v měření dvou samostatných zpravidla nezávislých veličin, rychlosti $u_{měř}$ a hloubky vody H . Tím je kontinuitní princip provozně méně přesný přístup, než metoda Q/H charakteristiky, kdy je měřena výhradně úroveň hladiny či hloubka vody. Po změření hloubky H lze určit ze známých rozměrů měrného profilu plochu průtočného průřezu S , která je obvykle k měřené hloubce H ve funkční závislosti. Přenásobením takto stanovené plochy S průřezovou rychlostí v , získanou kalibrací (koeficient k) ze změřené rychlosti $u_{měř}$ lze stanovit hledaný průtok ve smyslu:

$$Q = u_{měř} k S = v S. \quad (3.3)$$

Je-li využíván kontinuitní princip, pak se měřicí systém sestává z prizmatického úseku koryta a dále ze stejných komponentů, jako v případě využití konsumpčních křivek. [6]

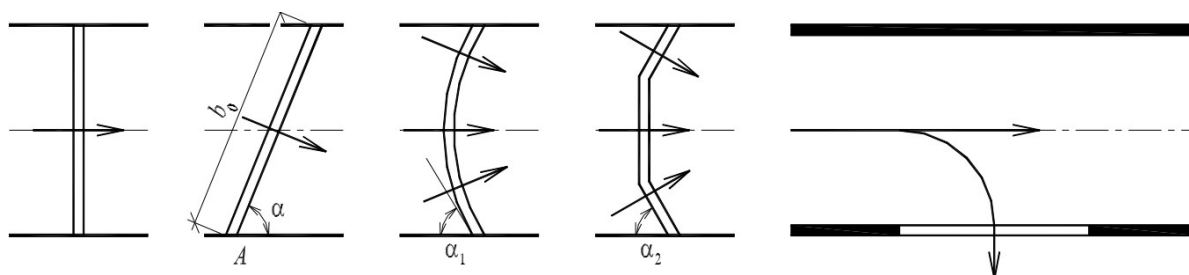
Existují i další metody měření průtoku v profilech s volnou hladinou, které však nesmí být zaměňovány za metody využívající jednoznačné funkční závislosti průtoku na úrovni hladiny. Jedná se například o výpočet průtoku za použití Chézyho rovnice nebo metoda koncové hloubky s dnovým poklesem na výtok z prizmatického koryta. Tyto metody jsou z hlediska legislativou požadované přesnosti stanoveného průtoku většinou nepoužitelné. [6]

3.1 Měrné přelivy

Přeliv je vzdouvací objekt, který protiproudě vzdouvá hladinu horní vody a zajišťuje přechod z proudění říčního do proudění bystrinného. Měrné přelivy mohou být dle tvaru a tloušťky přelivné stěny rozdělené na ostrohranné a přelivy s krátkou či širokou korunou.

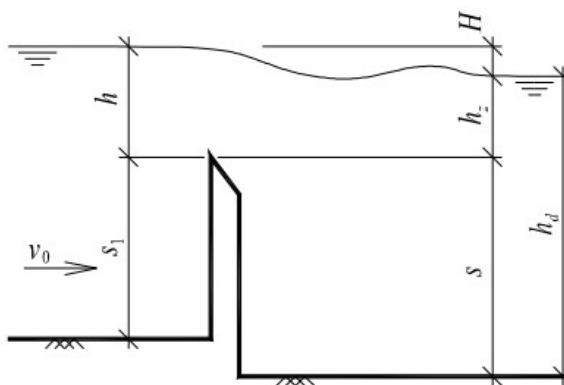
U druhých dvou typů je nicméně větší rozsah nejistoty stanoveného průtoku, jelikož ten je závislý na správném tvaru a rozměrech široké koruny. Ta může být nesprávně provedena, případně v delším časovém obzoru může dojít ke změně její drsnosti. Přelivy se skládají ze stěny s různým vytvarovaným průřezem, která je umístěná kolmo k proudu s volnou hladinou a přes kterou přepadá voda. Obecně: „konstrukce, přes kterou voda přepadá, se nazývá přeliv, nejvyšší část přelivu je přelivná hrana (nebo koruna přelivu). Přepadající proud vody se nazývá přepadový paprsek.“ [4] [7] [9]

Co se týče dalšího dělení, tak dle umístění přelivu vůči proudu vody se rozeznávají přelivy čelní s kolmo umístěnou přelivnou hranou k proudu vody, šikmé, obloukové, lomené a boční, kde je přelivná hrana umístěna rovnoběžně s osou proudu. [4]



Obr. 3.1 Typy přelivů dle umístění přelivné hrany: zleva čelní, šikmý, obloukový, lomený a boční [4]

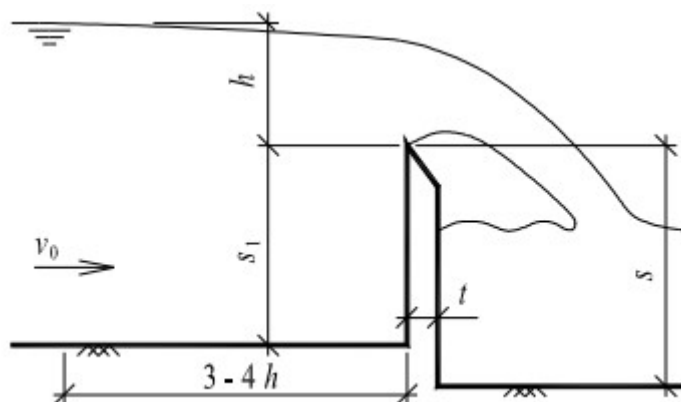
Podle ovlivnění přepadu hladinou dolní vody jsou rozlišovány přepady dokonalé a nedokonalé. Při nedokonalém přepadu neboli zatopeném, je hladina dolní vody nad úrovní přelivné hrany a snižuje objem vody přepadající přes přeliv. U přepadu dokonalého k ovlivnění dolní vodou nedochází, čímž je žádoucí pro dosažení přesných výsledků při měření. [4]



Obr. 3.2 Schéma nedokonalého přepadu u ostrohranného přelivu [4]

3.1.1 Ostrohranné přelivy

Tato práce se dále bude zabývat pouze měrnými přelivy ostrohrannými, protože jsou tvarově jednoznačné a pro přesné měření průtoků se využívají v praxi nejčastěji. [4] [6]



Obr. 3.3 Schéma ostrohranného přelivu s dokonalým přepadem [4]

Podmínka přepadu přes ostrou hranu je splněna, pokud tloušťka přelivné stěny:

$$t < 0,66 h, \quad (3.4)$$

kde h značí výšku přepadového paprsku. Díky tomuto faktu se v normách tento typ přelivů také označuje jako tenkostěnný. Pro docílení požadované přesnosti měření musí měrné ostrohranné přelivy mít uklidněný přítok, dostatečně svislou a hladkou přelivnou stěnu, dobře provedenou ostrou hranu, a zavzdušnění spodního líce přepadajícího paprsku, což zajistí průběh jevu za atmosférického tlaku. [4] [6].

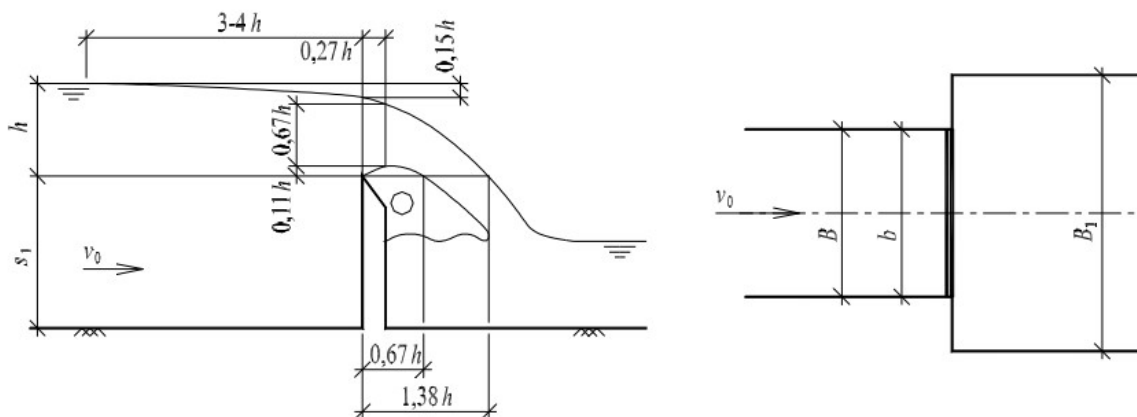
Průtok přes ostrohranné přelivy závisí na přepadové výšce (případně u nedokonalého přepadu na přepadové výšce a úrovni hladiny dolní vody), tvaru a velikosti průtočného průřezu a na experimentálně určeném součiniteli přepadu. Bazin odvodil rovnici pro výpočet průtoku přes přeliv:

$$Q = m b \sqrt{2g} h^{3/2}, \quad (3.5)$$

kde Q je průtočné množství přepadající přes přeliv, h výška přepadového paprsku, b šířka přelivné hrany, g gravitační zrychlení a m je Bazinův přepadový součinitel zahrnující vliv přítokové rychlosti, ztráty a kontrakce vzniklé při přepadu. Vztah pro tento součinitel Bazin experimentálně stanovil jako:

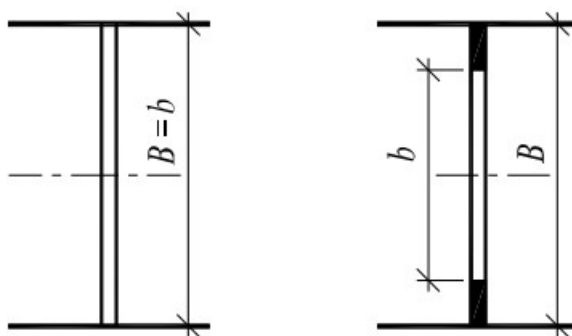
$$m = \left(0,405 + \frac{0,003}{h}\right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{h + s_1}\right)^2\right], \quad (3.6)$$

kde s_1 je výška přepadové hrany. Označení Bazinův přeliv nese pravoúhlý tenkostěnný přeliv, který má přelivnou hranu v celé šířce koryta (žlabu) a zavzdušněný prostor pod přepadovým paprskem. [4] [10]



Obr. 3.4 Bazinův přeliv s rozšířeným korytem pod přelivem [4]

Často používané jsou přelivy s bočním zúžením, u nichž vznikají výřezy různého tvaru. Mezi takovéto přelivy se řadí obdélníkový přeliv s boční kontrakcí, trojúhelníkový přeliv s různým středovým úhlem, lichoběžníkový přeliv a složený přeliv.



Obr. 3.5 Schéma přelivu bez zúžení a s bočním zúžením [4]

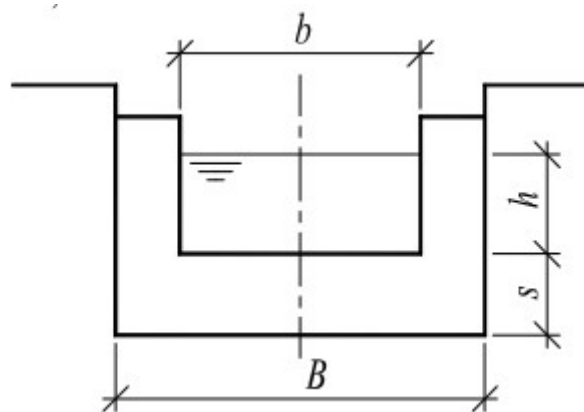
Výpočet průtoku v pravoúhlém přelivu s bočním zúžením, který se také nazývá Ponceletův, kdy šířka přelivné hrany b je menší než šířka přívodního koryta B , se řídí dle rovnice:

$$Q = m_b b \sqrt{2g} h^{3/2}. \quad (3.7)$$

Součinitel přepadu m_b se vypočte jako:

$$m_b = \left[0,405 + \frac{0,0027}{h} - 0,03 \left(1 - \frac{b}{B} \right) \right] \left[1 + 0,55 \left(\frac{S}{S_0} \right)^2 \right], \quad (3.8)$$

kde S je průtočný průřez výřezu a S_0 označuje průtočný průřez přívodního koryta. Tento typ měrných přelivů je vhodný zejména pro měření v lokalitách s vyrovnaným rozsahem průtoků, tedy pro malé vodní toky či vodní kanály s obdélníkovým průřezem. Schéma tohoto přelivu je na Obr. 3.6. [4] [9]



Obr. 3.6 Obdélníkový výřez přelivu s bočním zúžením [4]

Mezi nejčastěji používané měrné konstrukce typu přeliv se řadí také trojúhelníkový přeliv, který sestává z výřezu ve tvaru písmena „V“ v tenké svislé stěně. Je požadováno, aby osa souměrnosti tohoto výřezu byla svislá s totožnou vzdáleností od obou stěn koryta. Průtok přes trojúhelníkový přeliv lze získat vztahem:

$$Q = \frac{8}{15} \mu \sqrt{2g} \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) h^{5/2}, \quad (3.9)$$

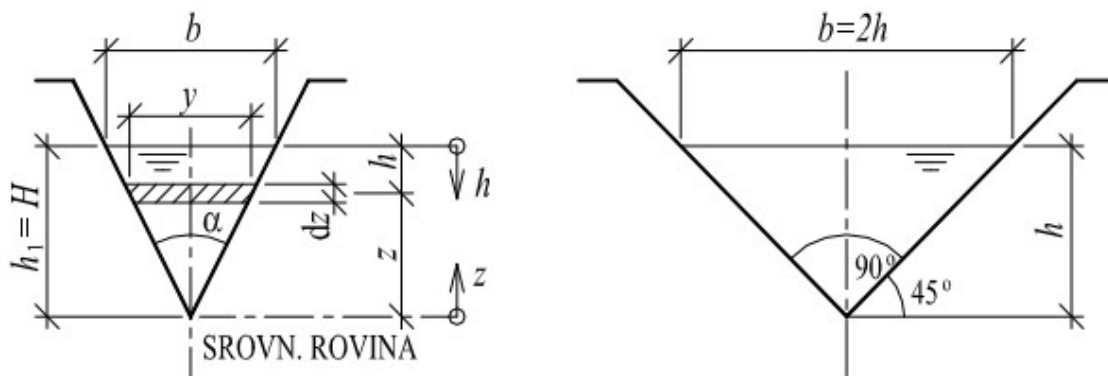
kde α značí vrcholový úhel trojúhelníkového výřezu a μ je přepadový součinitel závislý na výšce přepadového paprsku a úhlu α . Často dochází k substituci $m_t = \frac{8}{15} \mu$ a rovnice (3.7) je uváděna ve tvaru:

$$Q = m_t \sqrt{2g} \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) h^{5/2}. \quad (3.10)$$

Pokud bude úhel $\alpha = 90^\circ$, bude $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = 1$. Jelikož je přepadový součinitel pro tento úhel $m_t = 0,316$ a gravitační zrychlení je na povrchu Země konstantní, lze přepadové množství poté vyjádřit jako:

$$Q = 1,4 h^{5/2}. \quad (3.11)$$

Tento přeliv se nazývá Thomsonův. Obecně se trojúhelníkové přelivy používají pro lokality s větší rozkolísaností relativně malých průtoků. [4] [9] [10]

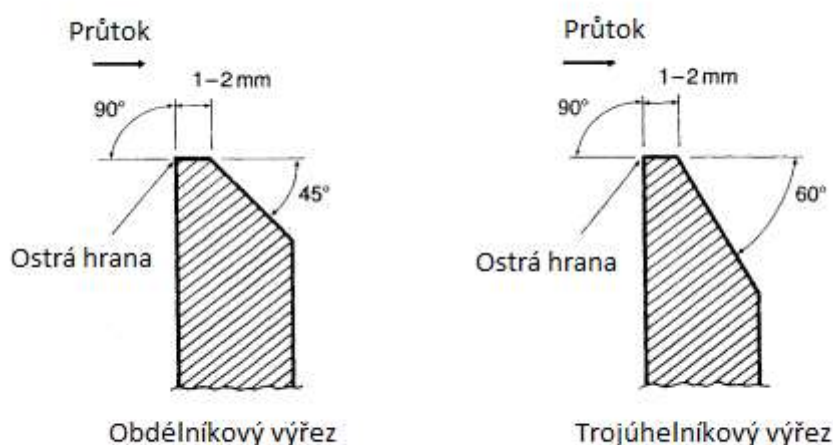


Obr. 3.7 Trojúhelníkový výřez přelivu s obecným úhlem α a Thomsonův přeliv [4]

Před všemi typy přelivů musí být správně provedeno přítokové koryto. To je část koryta, která se nachází protiproudě od přelivu do minimální vzdálenosti, která odpovídá alespoň pětinasobku šířky přepadového paprsku při maximální výšce přepadu. Pokud je přeliv umístěn v přelivovém boxu, měla by délka tohoto boxu být desetinásobná namísto pětinasobné. Přítokové koryto musí být navrženo a instalováno tak, aby bylo zajištěno ustálené rovnoměrné proudění s rozložením rychlostí blízkým pravidelnému. To, jaký je použit typ přelivu a jak je řešeno přítokové koryto, je dáno povahou měřicího místa. [10]

Část toku poproudě za měrným přelivem se nazývá odpadním korytem. U odpadního koryta jsou nároky zejména na jeho kapacitu, jelikož v rozsahu měrných průtoků je třeba zajistit dokonalé proudění. Při ovlivnění dolní vodou je totiž těžké určit jednoznačnou závislost průtoku na úrovni hladin a zvyšuje se úroveň nejistoty měřicího systému. Dalším požadavkem na odpadní koryto může být přístupnost do něj a návrh jeho parametrů s ohledem na proveditelnost kalibrace či posouzení funkční způsobilosti předmětného měřicího systému. Může se jednat buďto o jímání kapaliny (kdy by mělo být dno odpadního koryta o 0,60 m níže, než je nejnižší bod výřezu), případně stanovení průtoků metodou rychlostního pole při nemožnosti provést tuto metodu v přívodním korytě. [6]

Samotný přeliv musí odolat maximálnímu průtoku bez deformací. Je tvořen výřezem v rovinné, tuhé a kolmé stěně ke dnu a svahům koryta. Styky této stěny a koryta musí být vodotěsné, návodní líc stěny uhlazené a v prostoru výřezu a jeho blízkosti odpovídat povrchu válcovaného plechu. Šířka přelivné hrany je 1 mm až 2 mm a poté dochází ke zkosení o minimálně 45 °, viz Obr. 3.8. [10]



Obr. 3.8 Detail přelivné hrany [11]

3.2 Měrné žlaby

Vzdouvací objekt typu žlab je měřicí zařízení, které tvar otevřeného koryta buďto zužuje nebo v jeho dně tvoří vyvýšeninu (stupeň), případně obojí. Toto zúžení musí být realizováno do takové míry, aby vytvořilo podmínky pro přechod proudění z říčního do bystrinného za vzniku kritické hloubky. Žlaby se většinou skládají z části vstupní, hrdla a výstupní části. Na rozdíl od měrných přelivů je průtok realizován po celé šířce dna žlabu, čímž je umožněn transport sedimentu směrem dál po proudu. Výhodou žlabů je vysoký měrný rozsah, jednoduchý tvar konstrukce, relativně nízké nároky na stavební úpravy a fakt, že nezpůsobují vysokou energetickou ztrátu. [6] [9] [11]

Podle tvaru průtočného průřezu hrdla se rozlišují žlaby lichoběžníkové, pravoúhlé nebo ve tvaru písmene U, které mohou mít různou konstrukční délku hrdla. Nejpoužívanějšími žlaby v ČR jsou Parshallovy žlaby firmy PARS aqua, s.r.o. Volba typu měrného žlabu závisí na řadě faktorů. Jedná se např. o rozsah měřených průtoků, disponibilní spád, hranici dokonalého a nedokonalého režimu proudění, možnost prohloubení dna v korytě, splaveninový chod v korytě, požadovaná přesnost měření a jiné. [6] [12]

Umístění žlabu musí být v přímém úseku koryta bez překážek v proudu, značné drsnosti či nerovného dna. Přítokové koryto musí být protiproudě před měrným žlabem v délce rovné pěti až desetinásobku šířky v hladině při maximálním průtoku přímé, pravidelné a se stálým sklonem. Na začátku přítokového koryta by měla hodnota Froudova kritéria být menší nebo rovna 0,5, při úpravě rovnice (2.7) tak obdržíme vztah:

$$Fr = \frac{Q_{měř}}{S \sqrt{g y_{měř max}}}, \quad (3.12)$$

kde $y_{měř max}$ je maximální hloubka vody odpovídající maximálnímu průtoku měrným žlabem $Q_{měř max}$ a S je průtočná plocha. Je-li měrný žlab instalován do koryta, kde je nadkritické proudění, musí být prokázáno, že se přechod do podkritického režimu uskuteční ve vzdálenosti větší, než je třicetinásobek maximální hloubky proudu H_{max} . Do této vzdálenosti také musí být zajištěn volný přístup umožňující posouzení funkční způsobilosti měřicího systému. Požadavky na konstrukci žlabu jsou pevnost, vodotěsnost a schopnost odolat velkým vodám. Osa žlabu by měla být rovnoběžná se směrem proudění. Odtokové koryto musí být navrženo s ohledem na ovlivnění dolní vody tak, aby nedocházelo k zatopení žlabu při běžných podmínkách. [6] [12]

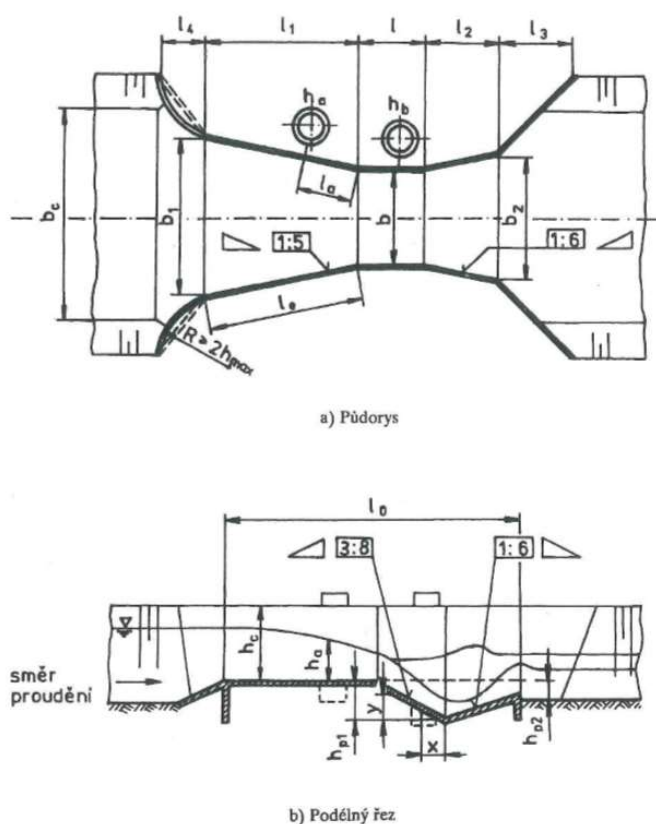
Následuje detailnější popis vybraných měrných žlabů.

3.2.1 Parshallovy žlaby

Parshallovy žlaby se zařazují mezi žlaby s dlouhým hrdlem a pro měření jsou vhodné zejména v lokalitách s vyrovnaným rozsahem průtoků. Mají pravoúhlý příčný průřez a značný rozsah šířek hrdla, od velmi malých (0,025 m) po velké (15 m). Jako standardní měřicí objekty jsou označovány středně velké Parshallovy žlaby se šířkou hrdla 0,15 m – 2,5 m, které mají rozsah průtoků 1,5 l/s – 4000 l/s. [9] [12]

Vtoková část má v podélném i příčném směru vodorovné dno a svislé boční stěny s půdorysným zúžením 1 : 5 vzhledem k ose žlabu. Hrdlo má v půdoryse rovnoběžné boční stěny a dno skloněné směrem po proudu ve sklonu 3 : 8. Výtoková část musí mít svislé boční stěny s půdorysným rozšířením 1 : 6 vzhledem k ose žlabu a skloněné dno směrem proti proudu ve sklonu 1 : 6. [12]

U Parshallových žlabů je očekávaná nejistota měření $\pm 4 \%$. S lineárně rostoucí přepadovou výškou roste i průtočná plocha lineárně. Výhodou Parshallova žlabu je měření přepadové hloubky již ve zužujícím se profilu, kde se nacházejí stabilnější proudnice díky tvaru zúžení a blízkosti skluzu v hrdle. Měření neovlivňují sedimenty, jelikož se usazují buďto před měrným objektem, nebo se při kulminačních průtocích odplaví za Parshallov žlab. [9]



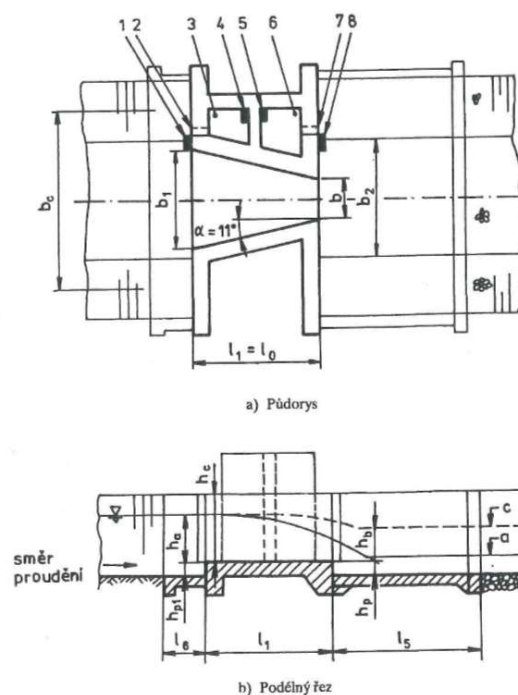
Obr. 3.9 Schéma Parshallova žlabu [12]



Obr. 3.10 Žlab typu PARS P3 na ČOV ve Velkých Bílovicích, zleva vtoková část, hladinoměrný snímač, hrdlo žlabu a výtoková část.

3.2.2 Žlaby typu Saniiri

Měrné žlaby typu Saniiri mají pravoúhlý příčný průřez a sestávají se z půdorysně zužující se vtokové části a náhlého rozšíření do odtokového koryta. Vtoková část má vodorovné dno a na jejím konci se nachází záporný stupeň ve dně. Rozsah měřených hladin u žlabů typu Saniiri je 0,1 m – 1,1 m. Jejich konstrukce je jednodušší než u Parshallových žlabů, jelikož žlaby typu Saniiri nemají tak velké hrdlo a rozšiřující se výtokovou část. [12]

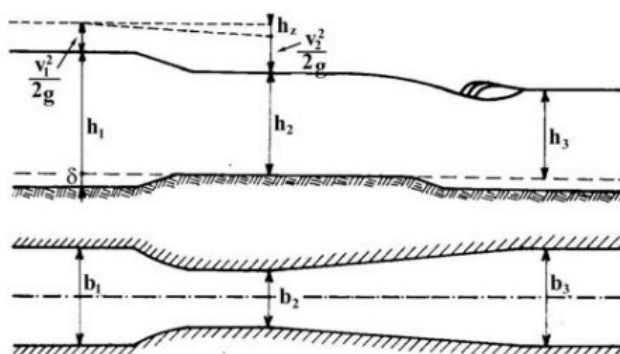


- Legenda
- 1 Vodočet
 - 2 Vtok do spojovací trubky vedoucí k ukliďovací šachtě 3
 - 3 Ukliďovací šachta pro měření h_a
 - 4 Zařízení na měření hladiny
 - 5 Zařízení na měření hladiny
 - 6 Ukliďovací šachta pro měření h_b
 - 7 Vtok do spojovací trubky vedoucí k ukliďovací šachtě 6
 - 8 Vodočet

Obr. 3.11 Schéma žlabu typu Saniiri [12]

3.2.3 Žlaby typu Venturi

Měrné žlaby typu Venturi mají v porovnání s Parshallovými žlaby podobnou hodnotu nejistoty měření ($\pm 7\%$). Jejich použití je omezeno větší hodnotou minimálního průtoku. V důsledku kratšího hrdla nejsou proudnice tak stabilní, jako u jiných žlabů. Měření úrovně hladiny se provádí ve značné vzdálenosti před žlabem. Nejpoužívanější žlaby s obdélníkovým průtočným průřezem a „krátkým“ hrdlem nejsou v ČR normalizovány. [6] [9]



Obr. 3.12 Schéma žlabu typu Venturi, shora – řez, půdorys [13]

4 CÍLE PRÁCE A MOTIVACE

Bakalářská práce se zabývá konkrétním návrhem měřicího systému (atypického měrného žlabu) na jezu Juřinka I v říčním kilometru 59,7 na řece Bečvě. V blízkosti jezu Juřinka se nachází společnost Deza, a.s. Valašské Meziříčí, která z Bečvy odebírá vodu pro technologické účely pomocí vtokového objektu. Ten je umístěn při pravém břehu v předpolí jezového stupně Juřinka. Objem vody, který smí být tímto objektem odebrán, nesmí omezit hodnotu minimálního zůstatkového průtoku, jenž je realizován poproudě pod jezem. V současné době tyto průtoky nejsou měřeny správným způsobem a jsou propouštěny přes jez lokálním snížením realizovaným bezprostředně za odběrným objektem. Bylo tak rozhodnuto, že v místě tohoto lokálního snížení bude navržen a vybudován měřicí systém pro zajištění korektního měření nízkých průtoků.



Obr. 4.1 Protiproudň pohled na jez Juřinka I

Výběr typu měřicího systému byl proveden na základě následujících okrajových podmínek a podmínek stanovených objednatelem:

- na měřicí systém je požadavek, aby pracoval v rozsahu průtoků od 500 l/s do 1500 l/s při maximální hloubce v předpolí jezu 0,7 m,

- měřicí systém musí umožnit trvalé a správné měření hloubky vzdutého proudu pomocí kalibrovatelného tlakového snímače,
- musí být umožněn chod splavenin měřicím systémem a ten musí tomuto namáhání odolat,
- jednoduchý princip práce měřicího systému,
- omočený povrch měřicího systému musí být jednoduše čistitelný,
- měřicím systémem musí být zajištěna správnost měření okamžitého průtoku s nejistotou menší než 10 % a současně musí být navržen tak, aby bylo možné v pravidelných intervalech u něj provádět posouzení funkční způsobilosti.

Z důvodu těchto požadavků nebylo možné navrhnout žádný z běžně užívaných měřicích systémů (vzdouvacích konstrukcí) uvedených v kapitolách 3.1 a 3.2. Měrné přelivy nesplňují požadavky na chod splavenin, Venturiho žlab a žlaby typu PARS zase požadavky na požadovaný měřicí rozsah průtoků při definované úrovni hladiny v předpolí jezového stupně. Byla tedy vytvořena koncepce atypického měrného žlabu, která by měla splňovat všechny výše uvedené podmínky.

Tato práce je rozdělena do dvou částí. V teoretické části (kapitoly 2,3) jsou popsány druhy proudění, podmínky vzniku jednotlivých proudění, přechod mezi nimi a následně měření průtoku v profilech s volnou hladinou s podrobnějším popisem měrných přelivů a žlabů. Praktická část (popsána v kapitole 5) se zabývá modelovým výzkumem atypického měrného žlabu. Zkoumáno je 5 různých variant žlabu (jednotlivé varianty charakterizovány v kapitole 5.2), které byly postupně instalovány v okruhu měrné trati Laboratoře vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Pro každou variantu bylo provedeno měření a stanovena Q/H charakteristika. Součástí praktické části je zpracování naměřených dat a vyhodnocení výsledků.

Cílem praktické části je nalezení vhodné varianty atypického žlabu (měřicího systému), který by měl s dostatečnou přesností pracovat ve výše uvedeném požadovaném rozsahu průtoků.

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Na jaře 2018 jsem v prostorách Laboratoře vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně provedl rozsáhlá experimentální měření Q/H charakteristik speciálně navrženého měrného žlabu. Ten byl zkoumán na dvou modelech, které mají různé měřítko délek a podrobněji budou popsány v následujících odstavcích.

V této kapitole je představena měřicí trať a technika nacházející se v laboratoři, charakterizován zkoumaný atypický měrný žlab, popsán experiment a měření. Na závěr jsou zpracována naměřená data a je provedeno jejich vyhodnocení.

5.1 Měřicí trať a technika

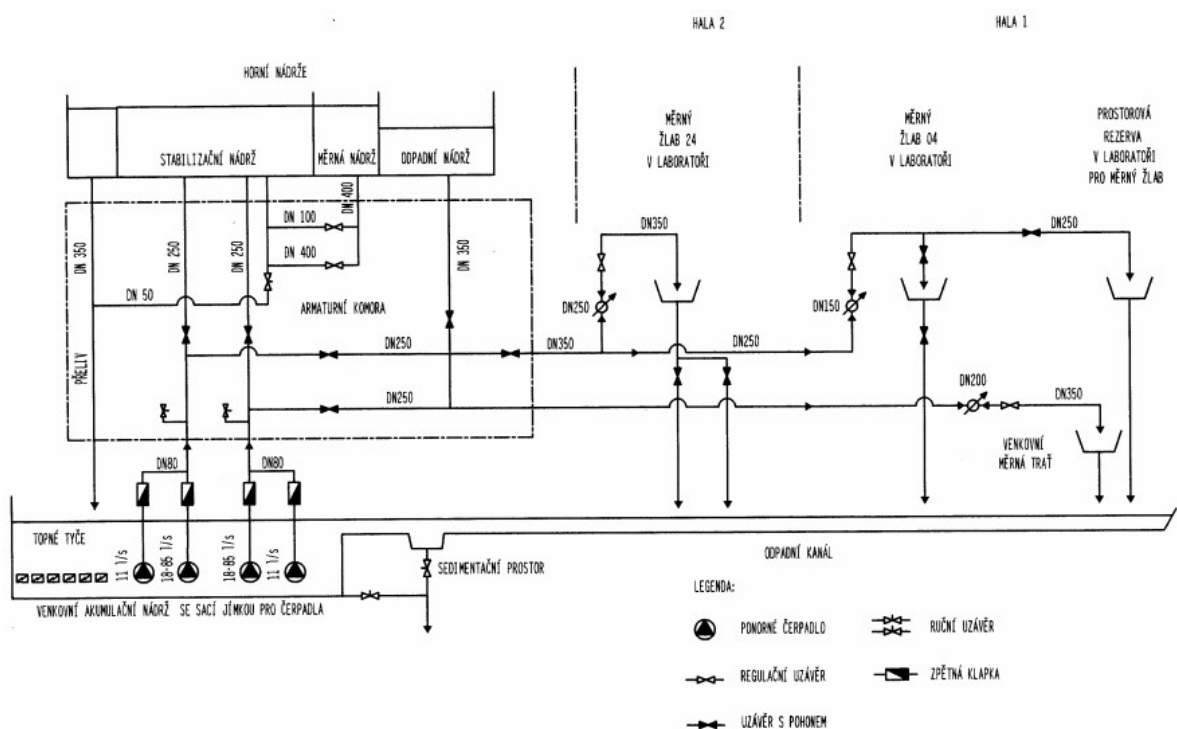
Veškerá měření proběhla v budově F1, v této podkapitole bude popsáno vybavení této laboratoře ve smyslu [14] (hydraulický okruh, měřicí trať a technika).

Oba zkoumané modely atypického žlabu byly instalovány do hydraulického měrného žlabu, kde byly provedeny veškeré experimentální práce. Hydraulický měrný žlab má jmenovitou šířku 0,4 m, délku 12,5 m, je sklopný s prosklenými stěnami a je napojen na hydraulický okruh laboratoře. Při experimentálních pracích byl hydraulický měrný žlab nastaven v nulovém sklonu. Modely byly instalovány 2,8 m protiproudě od konce tohoto žlabu a před modely byl protiproudě 8,0 m dlouhý prizmatický úsek s obdélníkovým průřezem sloužící k uklidnění přitékajícího proudu. Průtoková kapacita měrné tratě je až 40 l/s.



Obr. 5.1 Poproudní pohled na hydraulický měrný žlab laboratoře

Hydraulický okruh je založen na recirkulačním systému. Ovládání hydraulického okruhu je zajištěno řídicím počítačem a regulačními prvky, které se nachází v armaturní komoře. Voda je do hydraulického okruhu čerpána z akumulární nádrže, která má celkovou kapacitu 50 m³. V akumulární nádrži je umístěna sací jímka pro čtyři ponorná čerpadla odstředivého typu Flygt. Dvě čerpadla jsou malá o kapacitě 2 x 11 l/s a dvě jsou velká o kapacitě 2 x 85 l/s, která jsou řízena a regulována frekvenčními měniči. Řídicí systém a počítač jsou napojené na měřicí a řídicí okruhy laboratoře a umístěny na velínu. Řídicí počítač lze ovládat i dálkově přes program VNCViewer.



Obr. 5.2 Schéma hydraulického okruhu laboratoře [14]

Měření průtoku v laboratoři obstarávají dva magneticko-indukční průtokoměry. V rámci experimentálního měření byly využity oba dva. Průtoky v rozsahu 0,1 l/s – 4,0 l/s jsou měřeny průtokoměrem DN 32 a vyšší průtokoměrem DN 150. Každý průtokoměr má svou vyhodnocovací jednotku, kde lze nalézt údaje o průtoku. Vyhodnocovací jednotku průtokoměru DN 150 lze vidět na Obr. 5.3.



Obr. 5.3 Vyhodnocovací jednotka

Údaje o průtoku zjištěné z vyhodnocovacích jednotek byly následně korigovány výpočtem na základě kalibračních listů jednotlivých průtokoměrů. Pro průtokoměr DN 150 se jednalo o kalibrační list č. 48/2018 a pro průtokoměr DN 32 o kalibrační list č. 43/2018. Kalibrační laboratoř ENBRA, a.s provedla kalibrační měření měřidlem protečeného množství se zkušební objemovou metodou letným startem. Výsledkem je tabulka hodnot průtoků a k nim vztažených relativních chyb.

Tabulka 5.1 Kalibrace

Výrobce	Výrobní číslo	Dimenze	Číslo měření	Q	E_{R}^{RELAT}
[-]	[-]	[mm]	[-]	[l/s]	[%]
ELA spol. s.r.i. MQI 99 SMART N	036 47	150	1	101.11	-0.08
			2	50.28	-0.34
			3	9.92	0.41
	075 30	32	1	3.03	0.09
			2	1.51	0.00
			3	0.30	0.34

Na základě hodnot v Tabulce 5.1 dodané kalibrační laboratoří byl vytvořen graf závislosti relativní chyby na průtoku (Graf 5.1). Do grafu byly vyneseny hodnoty pro oba kalibrované průtokoměry. U průtokoměru DN 150 byly vybrány pouze body 50,28 l/s a 9,92 l/s, jelikož experimentální práce nevyžadovaly měření při vyšším průtoku. Tyto dva body byly vhodně proloženy lineární spojnici trendu s rovnicí:

$$E_R^{RELAT} = -0,0186Q + 0,5943. \quad (5.1)$$

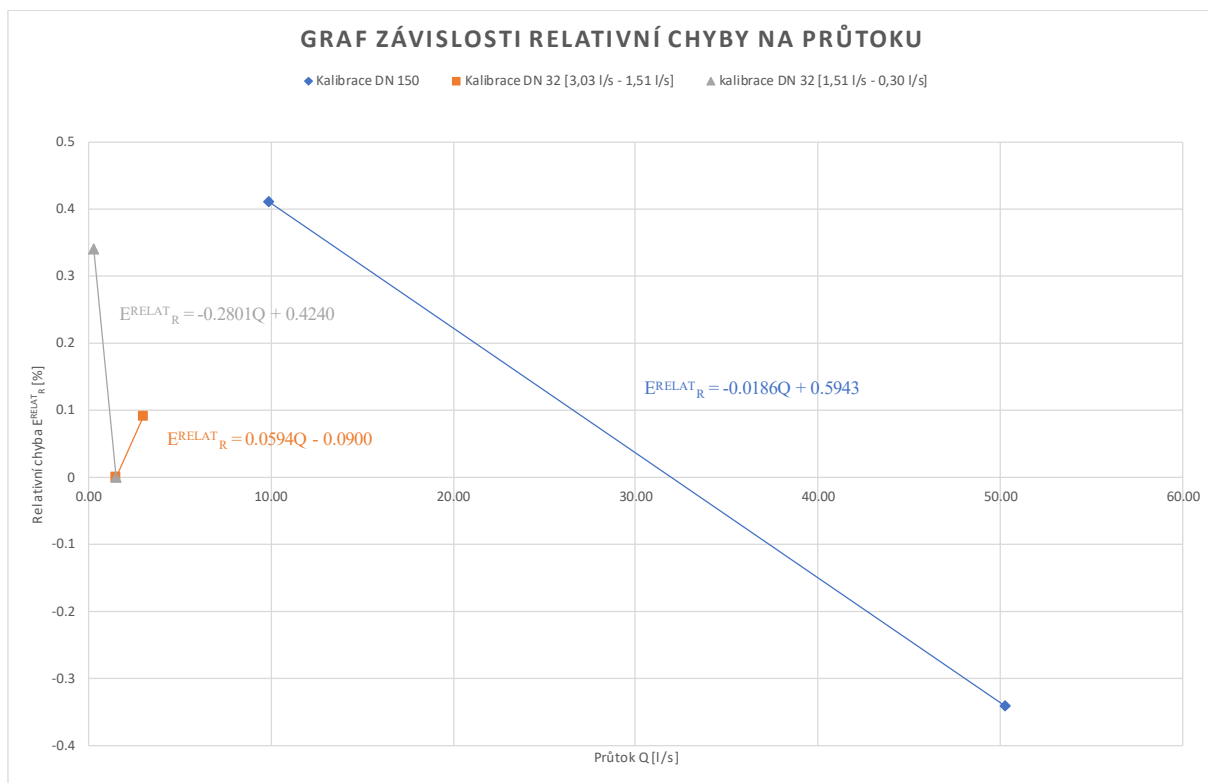
Pomocí této rovnice je tak možné určit relativní chybu při jakémkoliv průtoku měřeném průtokoměrem DN 150. U menšího průtokoměru DN 32 byly do grafu vyneseny všechny tři hodnoty, které byly následně vhodně proloženy dvěma lineárními spojnici trendu.

V měřicím rozsahu 3,03 l/s – 1,51 l/s lze u průtokoměru DN 32 určit relativní chybu na základě rovnice:

$$E_R^{RELAT} = 0,0594Q - 0,0900, \quad (5.2)$$

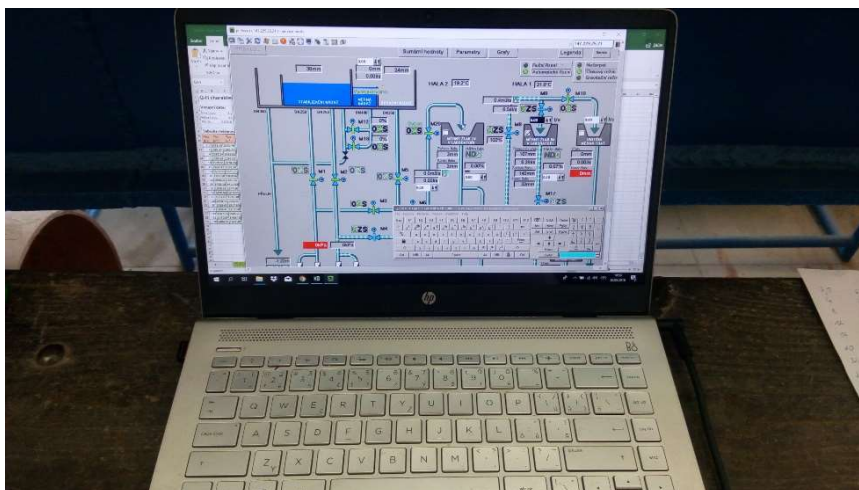
v rozsahu průtoků 1,51 l/s – 0,30 l/s pak ve smyslu rovnice:

$$E_R^{RELAT} = -0,2801Q + 0,4240. \quad (5.3)$$



Graf 5.1 Závislost relativní chyby na průtoku

Další použitou technikou bylo digitální hrotové měřítko (zobrazeno na Obr. 5.5), sloužící k měření úrovně hladin u obou modelů. Rozlišovací úroveň měřítka je 0,01 mm. K řízení hydraulického okruhu, zapisování a vyhodnocování dat byl použit notebook HP Pavilion, který lze vidět na Obr. 5.4.



Obr. 5.4 Ovládání hydraulického okruhu programem VNCViewer na notebooku HP. V pozadí program Microsoft Excel s připravenou tabulkou pro zápis dat.



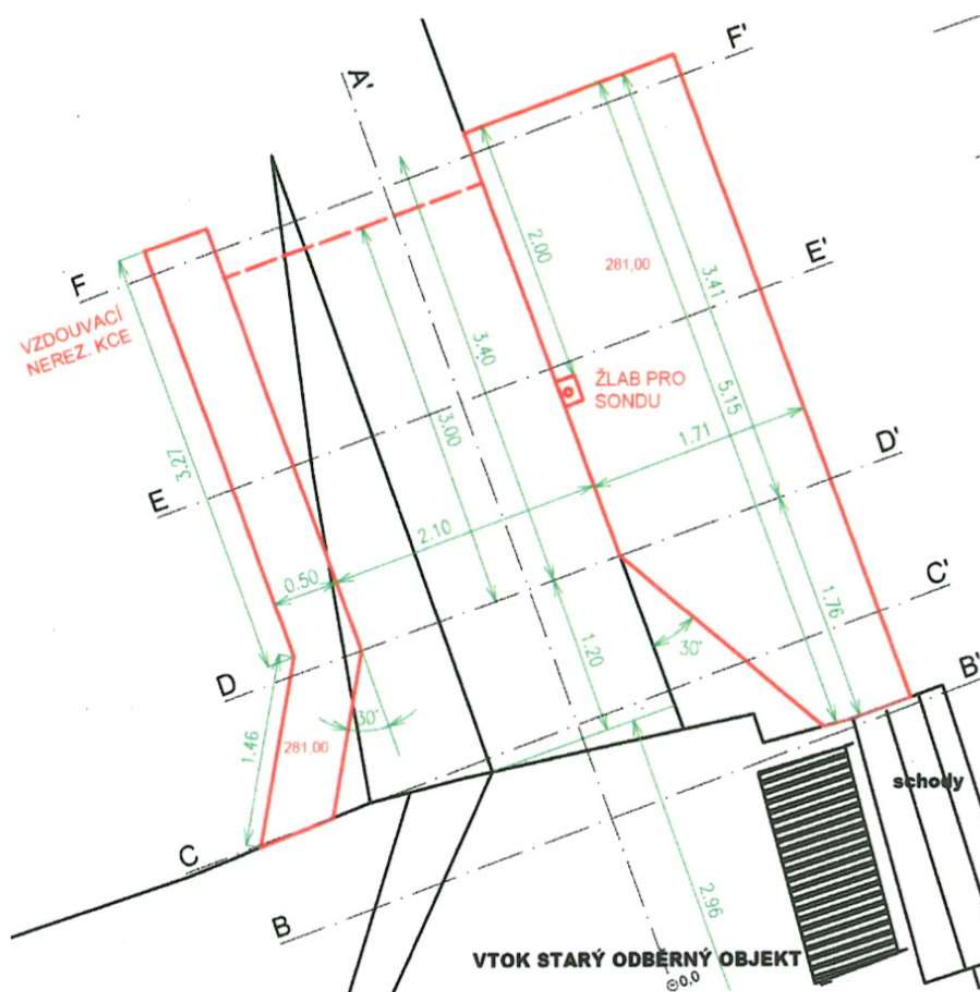
Obr. 5.5 Digitální hrotové měřítko sloužící k měření hladiny

5.2 Charakteristika zkoumaného atypického žlabu

Bakalářská práce se zabývá stanovením Q/H charakteristiky atypického žlabu, který bude v následující podkapitole popsán.

Měřicí systém (vzdouvací žlab a jeho přítokovou a odtokovou část) tvoří 2,1 m široký prizmatický kanál se zavazovacími křídly na vtoku. Délka žlabu je 3,4 m a na jeho konci je pevně instalovaná vzdouvací nerezová konstrukce tvořená rovinnými prvky. Výška rovinných

prvků je 0,7 m, což je maximální disponibilní hloubka pro převedení požadovaného průtoku 1500 l/s. Při překročení této hloubky v prostoru protiproudě před jezovým stupněm začne voda přepadat přes jeho přelivnou hranu. Měření průtoku tímto měřicím systémem je založeno na principu Q/H charakteristiky, přičemž hloubka proudu se bude měřit 2 m protiproudě od konce betonového žlabu. Situování měrného žlabu v profilu jezu s výše uvedenými délkovými kótami je zřetelné z Obr. 5.6.

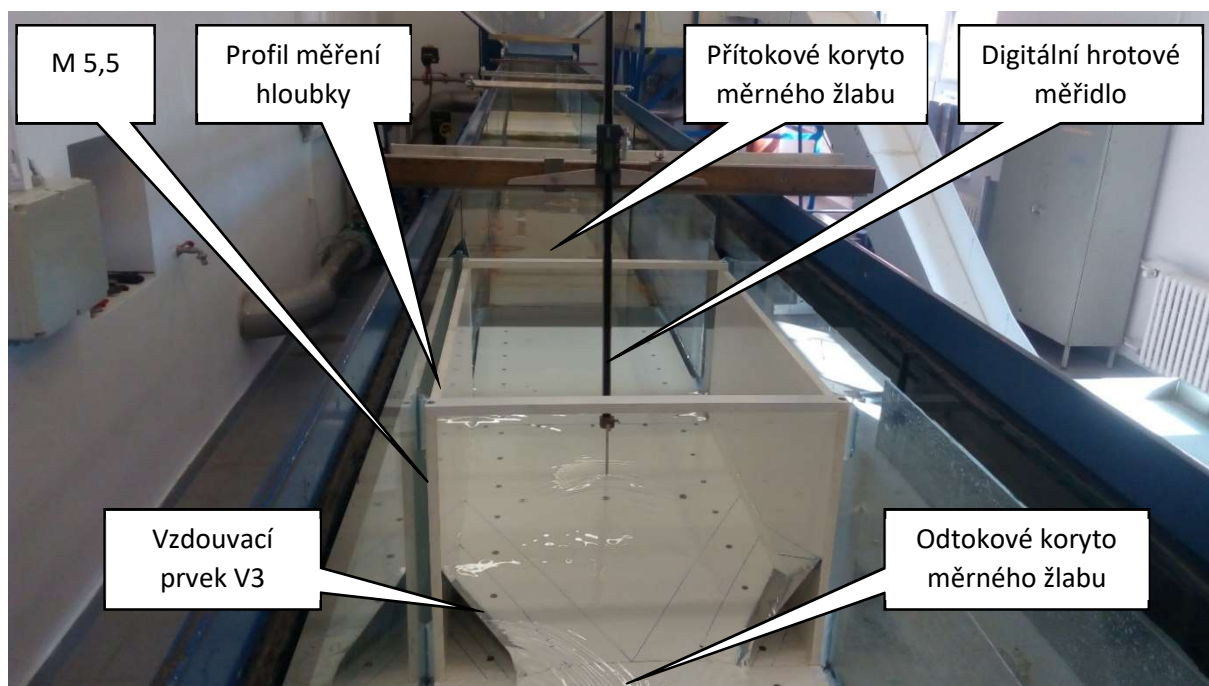


Obr. 5.6 Schéma atypického žlabu umístěného na jezu Juřinka I [15]

Na základě rozboru časových a prostorových možností laboratoře byly vytvořeny dva modely lišící se velikostí modelového měřítka, které byly podrobeny experimentálním pracím založeným na fyzikálním modelování. Větší model byl vytvořen v měřítku 1:5,545 (dále M 5,5) a menší 1:8,392 (dále M 8,5). Jednotlivé modely budou podrobněji popsány v kapitole 5.3. Na větším modelu bylo zkoumáno pět konstrukčních variant rovinných prvků V1 až V5. Vybraná varianta bude na díle zhotovena z nerezového materiálu a přikotvena ke stěnám betonového žlabu.

Na modelu menším byly zkoumány konstrukční varianty zavazovacích pilířů. Jednalo se o variantu přímou a dvě varianty v půdorysu kruhového oblouku vyrobené z nerezových prvků, které byly vhodně připevněné k přímé variantě zavazovacích křídel.

Na Obr. 5.7 lze vidět instalaci zkoumaného atypického měrného žlabu do měrné tratě laboratoře. Na uvedeném obrázku je instalovaný větší model M 5,5 s konstrukční variantou rovinných prvků V3 a popisem.

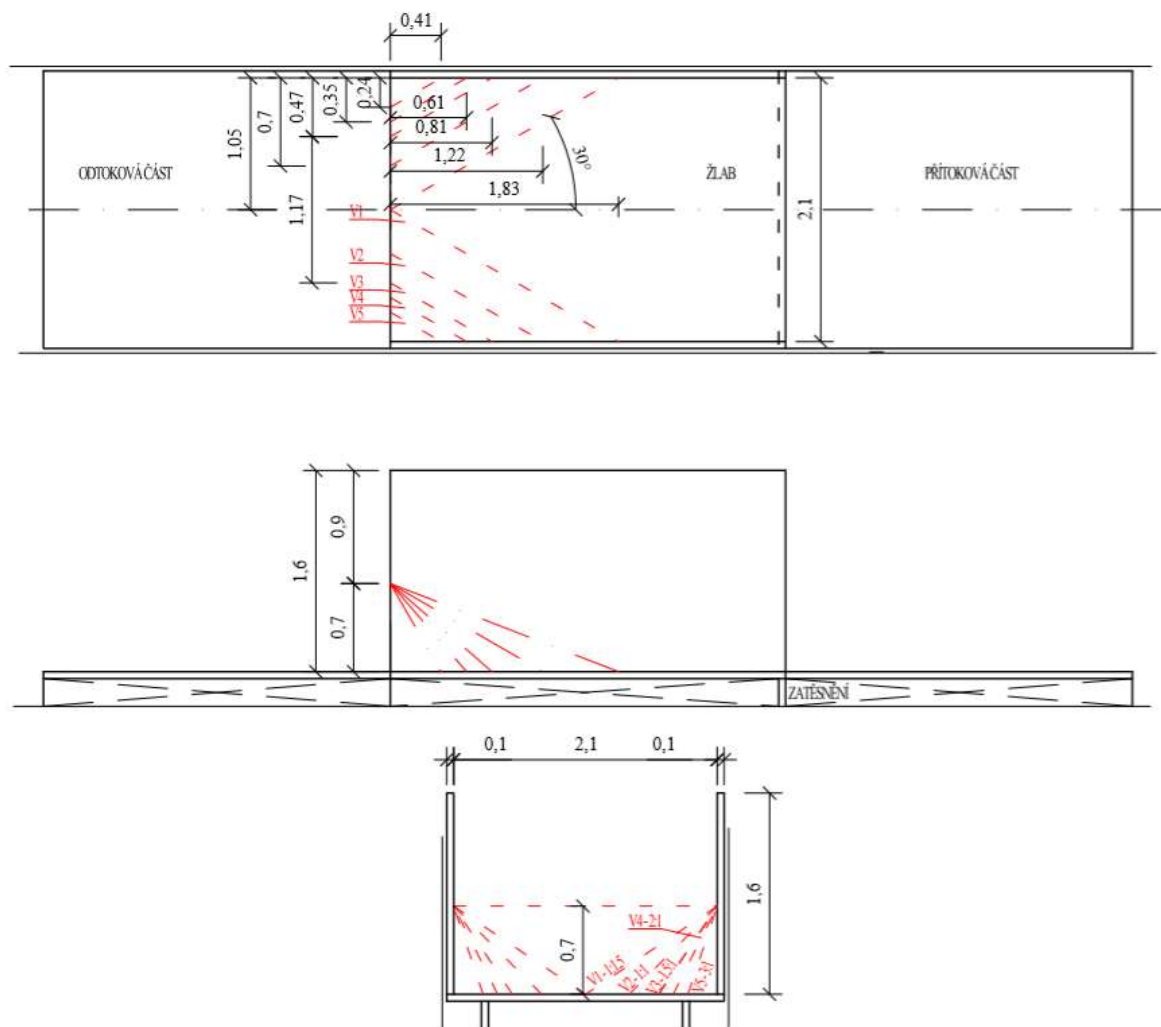


Obr. 5.7 Hydraulický měrný žlab s instalovaným modelem M 5,5 ve variantě V3 s popisem

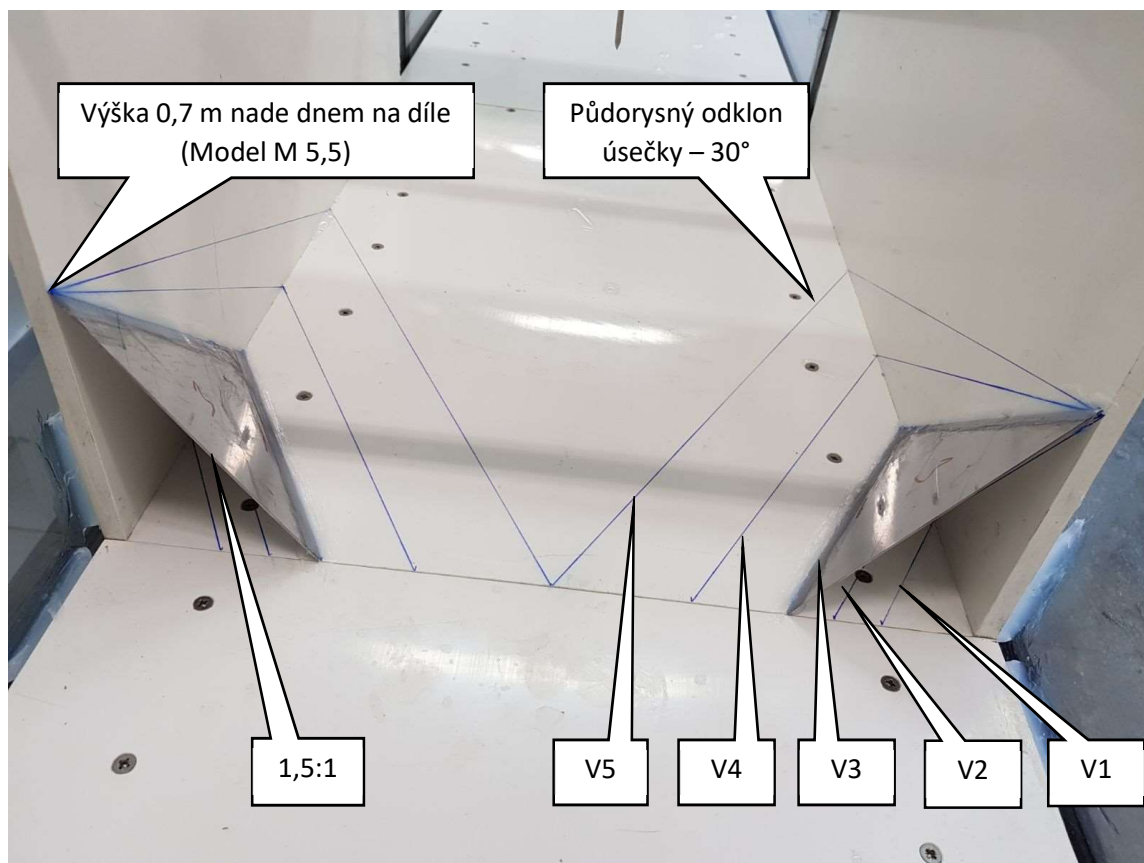
5.2.1 Charakteristika jednotlivých variant vzdouvacích prvků

Bylo navrženo pět tvarově odlišných variant vzdouvacích rovinných prvků. Jednotlivé varianty se od sebe liší velikostí průtočné plochy na konci žlabu (v hrdle). Průtočný profil byl zužován od varianty V1 až po variantu V5 za pomoci rovinných trojúhelníkových ploch. Tyto plochy byly instalovány symetricky s půdorysně vedenými dnovými úsečkami ve směru proudu pod úhlem 30 °. Konstrukční výška všech variant vzdouvacích prvků je 0,7 m na díle. Instalaci jednotlivých variant na modelu M 5,5 lze vidět na Obr. 5.9, Obr. 5.10 a Obr. 5.11.

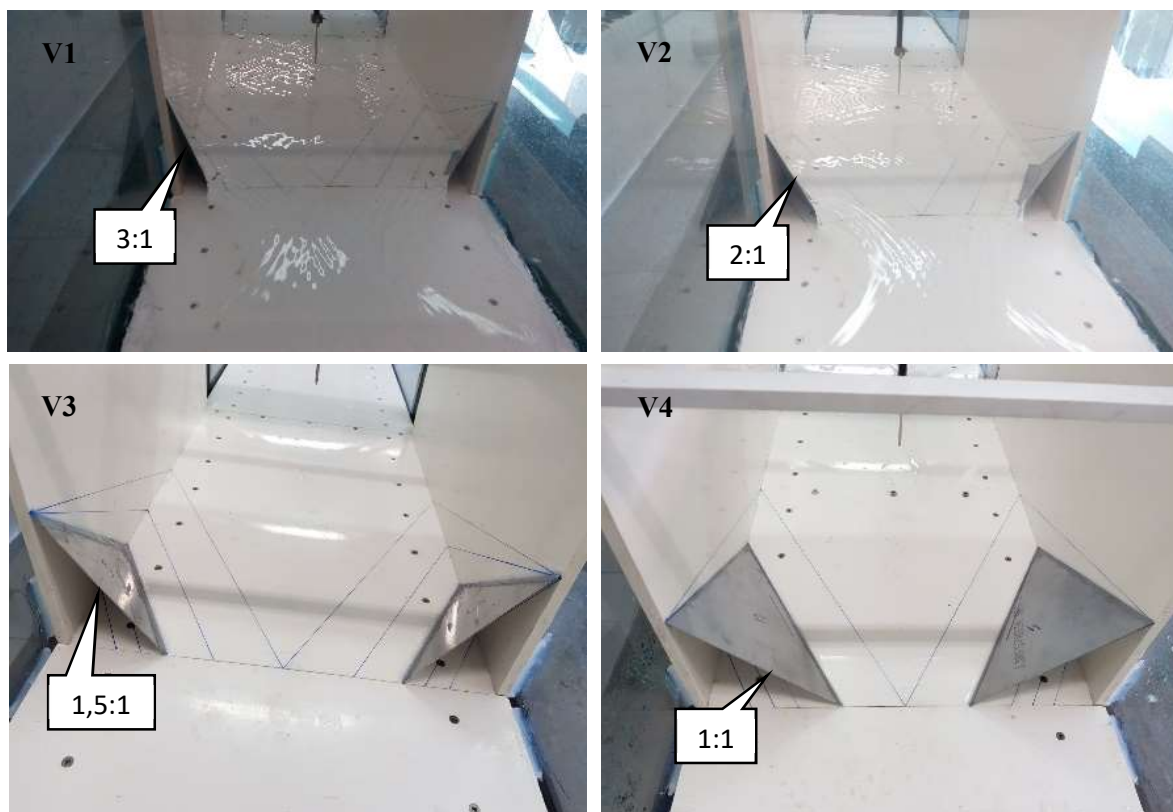
Na Obr. 5.8 lze vidět schéma (půdorys, podélný řez a protiproudň pohled) modelu M 5,5, kde jsou patrné sklony koncové hrany jednotlivých variant rovinného prvku. Pro větší přehlednost je toto schéma kótováno v metrech po přepočtu na dílo. Je však třeba zmínit, že se jedná o schéma modelu, který byl instalován do měrné tratě laboratoře a disponuje větší konstrukční výškou, než je tomu na díle.



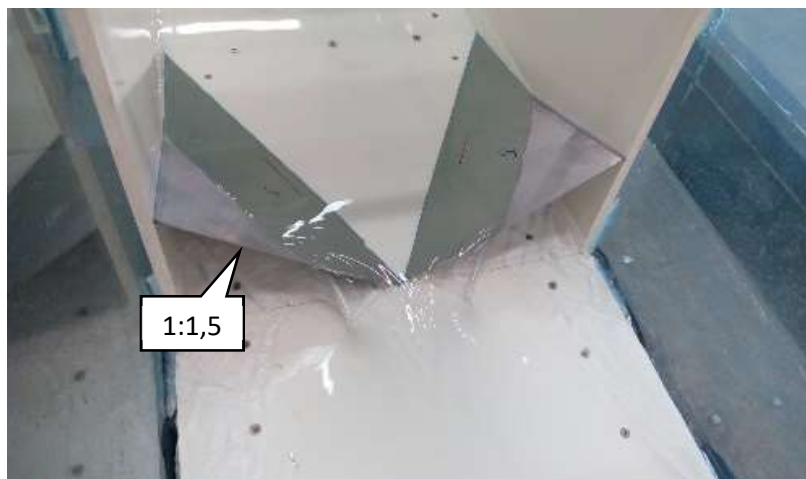
Obr. 5.8 Schéma atypického žlabu M 5,5 před umístěním do hydraulického měrného žlabu, shora – půdorys, podélný řez, pohled. Kótováno v metrech v přepočtu na dílo.



Obr. 5.9 Protiproudň pohled na M 5,5 s instalovanou variantou V3 a popisem



Obr. 5.10 Protiproudň pohled na M 5,5 s instalovanými variantami V1 až V4 s popisem sklonů koncových hran



Obr. 5.11 Protiproudňí pohled na M 5,5 s instalovanou variantou V5 s popisem sklonu koncové hrany

5.2.2 Charakteristika jednotlivých variant zavazovacích pilířů

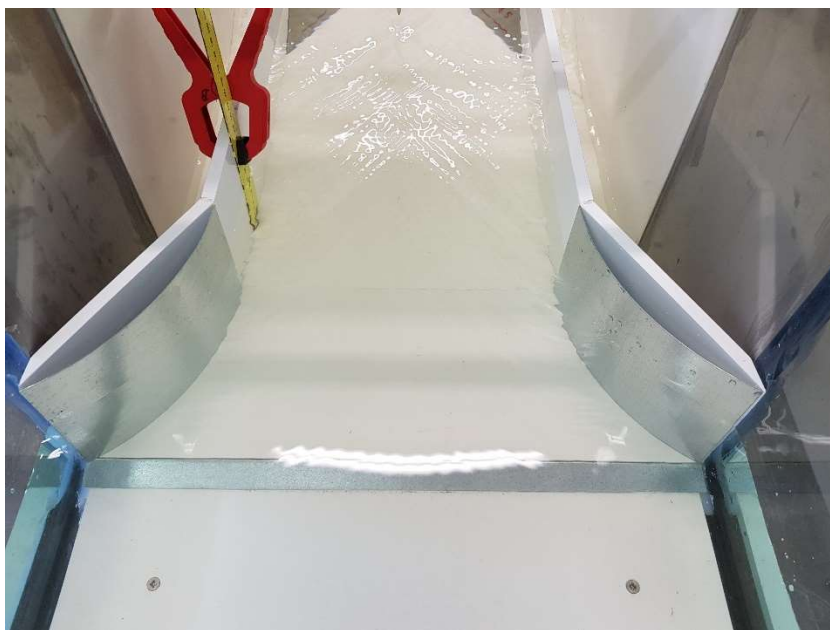
Byly navrženy tři odlišné varianty vtokových zavazovacích pilířů. První variantou byla v půdoryse přímá zavazovací křídla patrná z Obr. 5.12, která byla ve sklonu 30° s podélnou osou prizmatické části žlabu. Přímá zavazovací křídla mají délku po přepočtu na dílo $L = 1,2$ m.



Obr. 5.12 Poproudňí pohled na M 8,5 s přímými zavazovacími pilíři

Další dvě varianty byly konstrukčně tvořeny v půdorysu kruhovým obloukem. Byly navrženy dva typy oblouků, které byly napojeny tečně na boční stěny prizmatické části měrného žlabu. První varianta je označena jako V3_1 a má po přepočtu na dílo poloměr oblouku $R = 1,4$ m. Tato varianta je zřejmá z Obr. 5.13. Druhá navržená varianta usměrňovacích pilířů je patrná z Obr. 5.14, nese označení V3_2 a má hodnotu poloměru oblouku $R = 2,2$ m.

V prvním případě oblouk ve směru podélné osy žlabu odpovídá délce přímých zavazovacích křídel, ve druhém případě je delší.



Obr. 5.13 Popravní pohled na M 8,5 s usměrňovacími pilíři ve variantě V3_1



Obr. 5.14 Popravní pohled na M 8,5 s usměrňovacími pilíři ve variantě V3_2

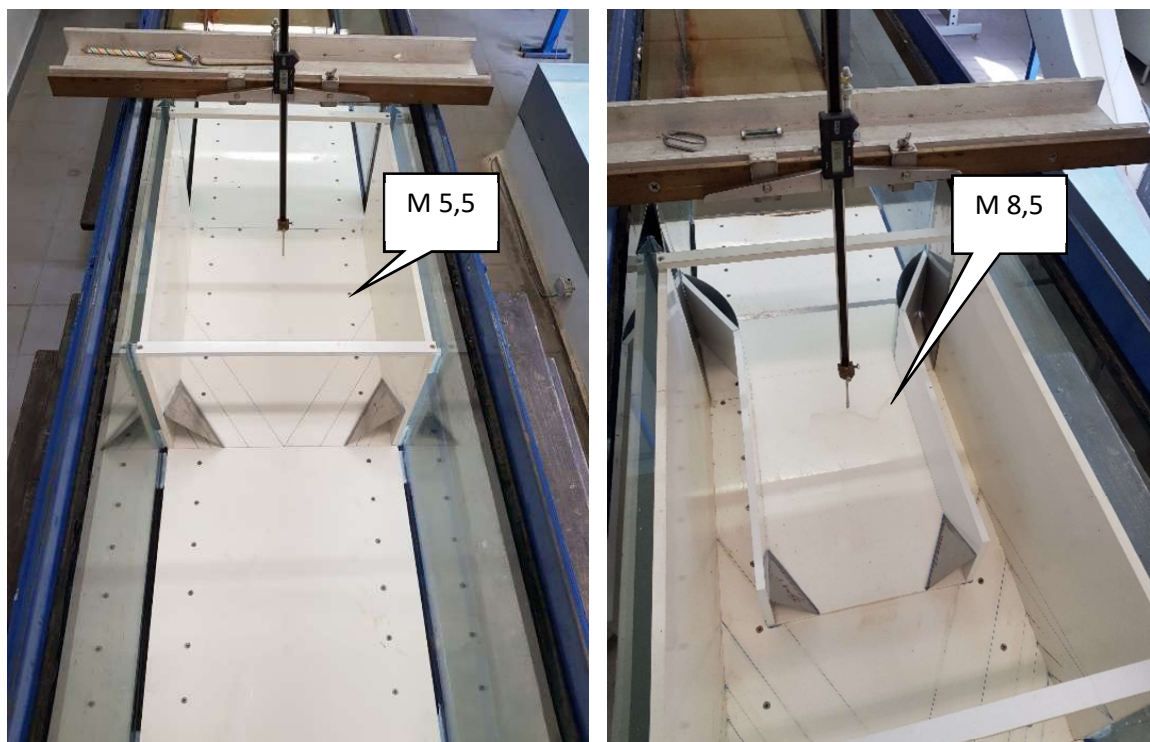
Důvod označení variant usměrňovacích pilířů jako právě V3_1 a V3_2 bude vysvětlen v kapitole 5.7.2.

5.3 Popis experimentu

Jak je uvedeno výše, pro účely experimentálních prací byly vytvořeny dva modely, které byly postupně instalovány do měrného žlabu jmenovité šířky 0,4 m. V první fázi experimentálních prací se jednalo o model rozměrově větší v délkovém měřítku 1:5,5. Tento

model sloužil k nalezení vhodného tvaru a rozměrů trojúhelníkových rovinných vzdouvacích prvků. V této fázi proběhla série celkem pěti měření, kdy pro každou konstrukční variantu V1–V5 byla stanovena jedinečná Q/H charakteristika. Modelován byl jen 3,4 m dlouhý úsek navrženého žlabu se všemi prvky. Přejít z průtočného profilu hydraulického měrného žlabu do průtočného profilu modelu byl realizován pozvolně vytvořenými přechodovými prvky z pozinkovaných plechů.

Ve druhé fázi experimentálních prací byl vytvořen rozměrově menší model s variantou vzdouvacích prvků, která nejvíce vyhovuje požadavku na měřicí rozsah navrženého měřicího systému. Tento model má měřítko délek 1:8,5 a byl vyroben pro účely optimalizace tvaru rozměrů usměrňovacích vtokových pílířů. Konstrukce modelu M 8,5 byla vhodně vlepena do prostoru modelu M 5,5.



Obr. 5.15 Protiproudň pohled na modely M 5,5 a M 8,5

5.4 Postup měření

Postup měření byl identický pro oba zkoumané modely. Při stanovení Q/H charakteristiky bylo pro každou variantu provedeno měření hloubky proudu ve žlabu při celkem 18 ustálených průtokových stavech v protiproudň vzdálenosti 2 m na díle od hrdla žlabu. Po ustálení průtoku byla měřena hloubka H vždy čtyřikrát digitálním hrotovým měřítkem a zapsána s přesností na dvě desetinná místa. Výsledná hloubka je aritmetickým průměrem těchto měření. Při měření

na modelu M 8,5 byla také při několika vybraných průtokových stavech měřena hloubka proudu před vtokem do prostoru měrného žlabu pro určení součinitele místní ztráty, který bude dále popsán v kapitole 5.5.

Průtok byl pouštěn a nastavován přes program VNCViewer. Na modelu M 5,5 proběhlo měření při průtocích od 4 l/s do 40 l/s (Průtoky v této podkapitole jsou uváděny před přepočtem na dílo). Měření bylo provedeno za průtokových stavů v tomto pořadí: (4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 38, 34, 30, 26, 22, 18, 14, 10, 6) l/s. Při stanovování Q/H charakteristiky nejprve na vzestupné větvi průtokových stavů a poté na sestupné se zamezí možnosti systematické chyby v měření. Měření na modelu M 8,5 bylo provedeno při 13 průtokových stavech nabývajících hodnot od 1 l/s po 13 l/s. Měření proběhlo od průtokového stavu 1 l/s vzestupně přes liché hodnoty průtoků po nejvyšší průtok a sestupně od 12 l/s přes sudé hodnoty průtoků po 2 l/s. Měření tedy bylo provedeno i za hloubek, které při přepočtu na dílo jsou vyšší, než je disponibilní hloubka 0,7 m, při jejímž překročení začne počátek přepadu vody přes přelivnou hranu jezového stupně.

Údaje o průtoku byly zjišťovány z vyhodnocovacích jednotek obou indukčních průtokoměrů. Na vyhodnocovací jednotce byl odečten údaj o objemu protečeného množství vody a zapnuty mechanické stopky, po uplynutí časového integračního intervalu byl odečten druhý údaj o objemu protečeného množství. Časový interval odečítání protečeného množství při měření nižších hodnot průtoků narůstal z důvodu vyšší přesnosti měření. Platí, že údaje o průtoku z vyhodnocovacích jednotek obou indukčních průtokoměrů byly získány vždy minimálně z minutového integračního intervalu.

5.5 Zpracování naměřených dat

Mezi naměřená data patří hloubka proudu a údaje o průtoku odečtené z vyhodnocovacích jednotek (viz kapitola 5.4). S těmito hodnotami se dále pracovalo a v této podkapitole budou uvedeny veškeré výpočty, které vedly ke stanovení předmětných Q/H charakteristik. Naměřená data byla zpracována matematicky i graficky v programu Microsoft Excel. V Tabulce 5.2 lze vidět zeleně označené naměřené a modře označené vypočtené veličiny varianty V3.

Tabulka 5.2 Zpracování měřených veličin varianty V3

																α	1.05	ξ	0.04
Q _{pož}	V _{kon}	V _{poč}	t	Q _{měř}	E _{relat}	Q _{kor}	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _{měř}	H _{skut}	Q _{skut}	Q _{reg}	δ	s	v	αv ² /2g	E
[l/s]	[m ³]	[m ³]	[s]	[l/s]	[%]	[l/s]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]	[m ²]	[m/s]	[m]	[m]
4	77.64	77.16	120	4.00	0.52	4.021	44.62	44.82	44.75	44.63	44.71	0.248	0.291	0.292	0.26	0.521	0.56	0.017	0.261
6	416.20	415.48	120	6.00	0.48	6.029	56.42	56.61	56.20	56.36	56.40	0.313	0.436	0.433	-0.69	0.657	0.66	0.023	0.337
8	82.97	82.00	120	8.08	0.44	8.119	66.65	66.39	66.55	66.87	66.62	0.369	0.588	0.584	-0.63	0.776	0.75	0.030	0.401
10	410.42	409.20	120	10.17	0.41	10.208	75.92	75.41	75.34	75.69	75.59	0.419	0.739	0.739	-0.03	0.880	0.84	0.038	0.458
12	90.19	89.50	60	11.50	0.38	11.544	80.96	80.79	80.53	80.52	80.70	0.447	0.836	0.837	0.13	0.940	0.89	0.042	0.492
14	402.99	402.15	60	14.00	0.33	14.047	89.44	89.23	89.29	89.42	89.35	0.495	1.017	1.020	0.28	1.040	0.98	0.051	0.549
16	101.56	100.60	60	16.00	0.30	16.047	95.50	95.57	95.31	95.92	95.58	0.530	1.162	1.166	0.33	1.113	1.05	0.059	0.591
18	392.79	391.70	60	18.17	0.26	18.213	101.57	101.55	102.60	101.19	101.73	0.564	1.319	1.322	0.24	1.185	1.12	0.067	0.633
20	111.79	110.60	60	19.83	0.23	19.878	106.82	106.62	106.80	106.78	106.76	0.592	1.439	1.458	1.32	1.243	1.17	0.074	0.668
22	374.95	373.60	60	22.50	0.18	22.540	112.96	113.32	111.97	111.98	112.56	0.624	1.632	1.627	-0.31	1.311	1.24	0.082	0.710
24	127.24	125.80	60	24.00	0.15	24.035	115.83	115.39	115.63	116.03	115.72	0.642	1.740	1.723	-0.97	1.347	1.28	0.088	0.733
26	360.47	358.90	60	26.17	0.11	26.195	120.85	120.50	120.37	120.80	120.63	0.669	1.896	1.880	-0.84	1.405	1.34	0.096	0.768
28	157.44	155.75	60	28.17	0.07	28.186	124.96	125.38	125.62	125.03	125.25	0.694	2.040	2.036	-0.21	1.458	1.40	0.104	0.803
30	326.22	324.40	60	30.33	0.03	30.342	129.69	130.56	130.55	130.19	130.25	0.722	2.197	2.214	0.78	1.517	1.46	0.114	0.841
32	183.40	181.50	60	31.67	0.01	31.668	133.62	133.75	134.05	133.21	133.66	0.741	2.293	2.340	2.04	1.556	1.50	0.121	0.867
34	302.65	300.60	60	34.17	-0.04	34.153	138.26	137.99	138.22	137.98	138.11	0.766	2.472	2.513	1.60	1.608	1.56	0.131	0.901
36	236.08	233.91	60	36.17	-0.08	36.138	140.32	140.29	140.80	140.11	140.38	0.778	2.616	2.603	-0.50	1.635	1.59	0.136	0.919
38	276.98	274.70	60	38.00	-0.11	37.957	142.69	142.89	142.22	142.63	142.61	0.791	2.748	2.694	-1.99	1.661	1.62	0.141	0.937
40	255.41	253.00	60	40.17	-0.15	40.105	145.57	145.62	146.04	145.39	145.66	0.808	2.903	2.822	-2.88	1.696	1.66	0.148	0.961
Veličiny při hledané výšce E = 0,7m												0.619	1.599		1.300	1.23	0.081	0.700	

Měřený průtok $Q_{měř}$ je určen jako:

$$Q_{\text{měř}} = \frac{V_{\text{kon}} - V_{\text{poč}}}{t}, \quad (5.2)$$

kde $V_{poč}$ je objem vody odečtený na vyhodnocovací jednotce a V_{kon} je hodnota objemu vody v čase t . Naměřený průtok byl korigován pomocí relativní chyby měření vypočtené pro každý průtokový stav. U průtoků měřených průtokoměrem DN 150 ve smyslu rovnice (5.1), u nižších průtoků ve smyslu rovnic (5.2) a (5.3). Rovnice pro výpočet korigovaného průtoku Q_{kor} je:

$$Q_{kor} = \frac{Q_{m\check{e}r}}{\left(\frac{1}{\frac{E_R^{RELAT}}{100} + 1} \right)}. \quad (5.3)$$

Hloubka proudu $H_{měř}$ byla získána z aritmetického průměru měřených hloubek k danému průtokovému stavu, tedy:

$$H_{m\check{e}r} = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4}{4}. \quad (5.4)$$

Takto získané hodnoty průtoků a hloubek proudu byly následně přepočteny z modelu na dílo ve smyslu zákonů mechanické podobnosti [16]. Hodnoty délek (hloubek $H_{měř}$) a průtoku Q_{kor} z modelu byly přepočteny na dílo (skut) ve smyslu následujících vztahů:

$$H_{skut} = M_l H_{měř} , \quad (5.5)$$

$$Q_{skut} = M_l^{2,5} Q_{kor} , \quad (5.6)$$

kde M je velikost délkového měřítka. Po dosazení velikosti měřítka jsou na základě výše uvedených poznatků tedy u M 5,5 $H_{skut} = 5,5447 H_{měř}$, $Q_{skut} = 72,39 Q_{kor}$, u M 8,5 $H_{skut} = 8,3919 H_{měř}$, $Q_{skut} = 204,01 Q_{kor}$.

Přepočtené hodnoty průtoku a k nim vztažené přepočtené hodnoty hloubky proudu byly následně vyneseny do grafu. Tyto body byly vhodně proloženy polynomem třetího řádu, což bude podrobně popsáno v kapitole 5.6, čímž vznikla pro každou zkoumanou variantu a měření jedinečná Q/H charakteristika. Konečné hodnoty průtoků Q_{reg} byly získány přepočítáním průtoků Q_{skut} na proloženou křivku pomocí rovnice dané křivky, viz (5.10) níže. Chyba individuálních měření od regresí stanovených hodnot byla pro kontrolu správnosti regresních postupů určena jako:

$$\delta_i = \frac{Q_{regi} - Q_{skuti}}{Q_{regi}} \cdot 100. \quad (5.7)$$

Součástí zpracování měření bylo také určení hloubky E , která se bude realizovat pro každou z příslušných variant v předpolí jezové konstrukce. Ta je logicky vyšší než hodnota hloubky proudu H v profilu jejího měření. Z energetické bilance mezi profilem v předpolí jezu a profilem v místě měření hloubky atypickým měrným žlabem lze ve smyslu rovnice (2.2) získat následující vztah:

$$E = H + \frac{\alpha v^2}{2g} + \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (5.8)$$

kde ζ je součinitel místních ztrát, který zahrnuje energetické ztráty mezi těmito dvěma profilem. Tento součinitel byl určen na modelu M 8,5. Z měření rozdílů hladin a energetické bilance mezi měrným profilem a profilem před vtokem do měřicího systému bylo možné určit hodnotu součinitele ζ jako:

$$\zeta = \frac{H_{0,skut} + \frac{\alpha v_0^2}{2g} - \frac{\alpha v^2}{2g} - H_{skut}}{\frac{v^2}{2g}}, \quad (5.9)$$

kde $H_{0,skut}$ značí hloubku proudu a v_0 rychlost, obojí před měrným žlabem, obdobně pak jsou H_{skut} hloubka proudu v měrném profilu a v rychlost v měrném profilu. Jelikož se součinitelem ζ bylo počítáno v celém rozsahu sledovaných průtoků u všech měřených variant, dovolíme si již na tomto místě uvést jeho hodnotu. Ta činila 0,04, což bude podrobněji vysvětleno v kapitole 5.7.2. Velikost Coriolisova čísla α byla zvolena 1,05.

Rychlost proudu v měrném profilu byla určena z rovnice (2.4), přičemž průtočná plocha S je vypočtena součinem šířky žlabu a hloubky hladiny H_{skut} .

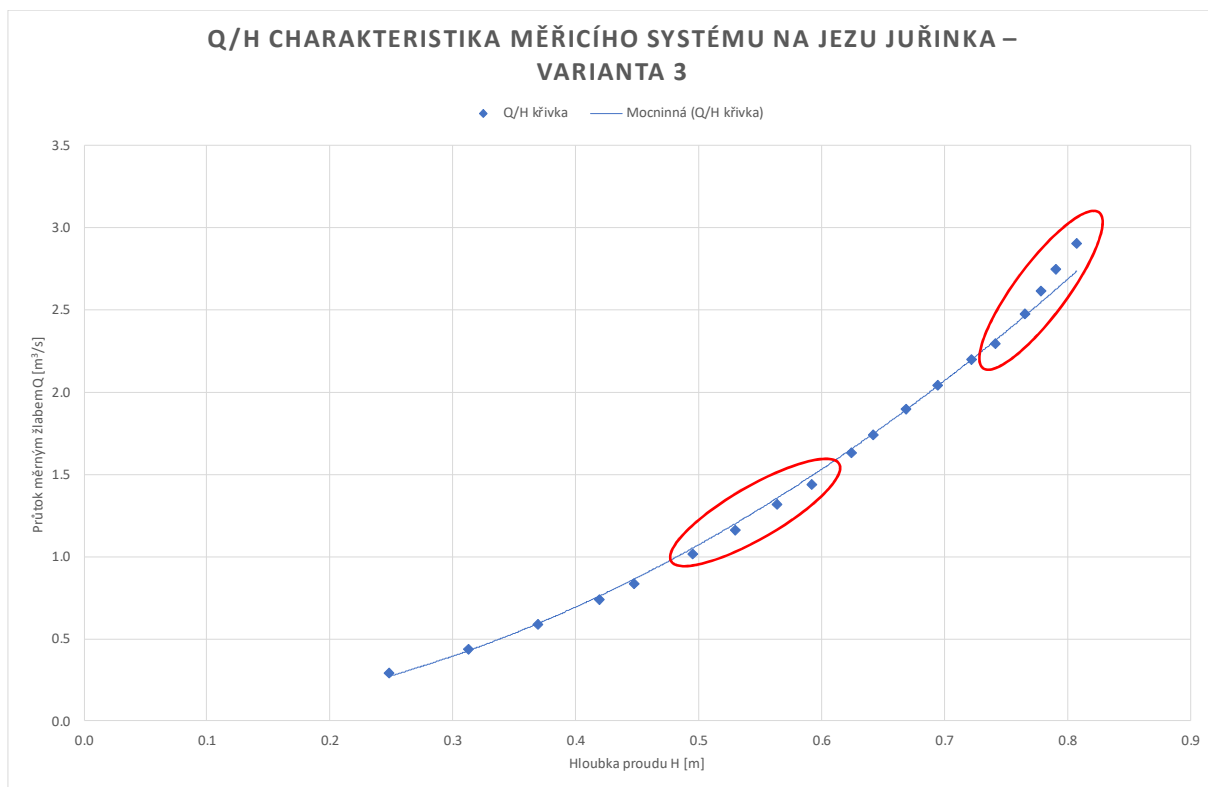
Výsledkem zpracování dat je tabulka s veškerými naměřenými a zpracovanými hodnotami, dále grafické vynesení Q/H charakteristiky a její transformace na závislost průtoku Q na hloubce proudu E (dále jen Q/E charakteristika) ve smyslu rovnice (5.8).

5.6 Proložení bodů Q/H charakteristiky spojnicí trendu

Při zpracování měření bylo nutné vhodně proložit všechny body vynesené do grafů (viz kapitola 5.5) pomocí spojnice trendů. V této podkapitole bude popsáno, jaká matematická funkce je nejvhodnější na proložení experimentálně měřených bodů. Jelikož lze všechny varianty V1 až V5 vystihnout stejným typem spojnice trendu, byla vybrána varianta V3 pro prezentaci vhodnosti proložení.

Cílem bylo najít spojnicí trendu v programu Microsoft Excel, která by nejlépe charakterizovala hodnoty získané měřením. Na základě teoretických poznatků uvedených v kapitole 3 se uvažovalo zejména o mocninnou spojnicí trendu a polynomicou druhého a třetího řádu. Jiné možnosti spojnic trendu jako je exponenciální, lineární, logaritmická či klouzavý průměr byly vyloučeny. Při hledání správné regresní funkce byl kladen požadavek na to, aby křivka s dostatečnou spolehlivostí a shodou vystihovala všechny body a ty byly rovnoměrně rozloženy nad a pod křivkou. Pro určení matematické funkce byly použity všechny měřené průtokové stavy a k nim vztažené hloubky proudu, aby byl nejlépe vystižen charakter měřených dat. Při další analýze dat byly následně odebrány stavy výrazně překračující průtoky nad $2 \text{ m}^3/\text{s}$.

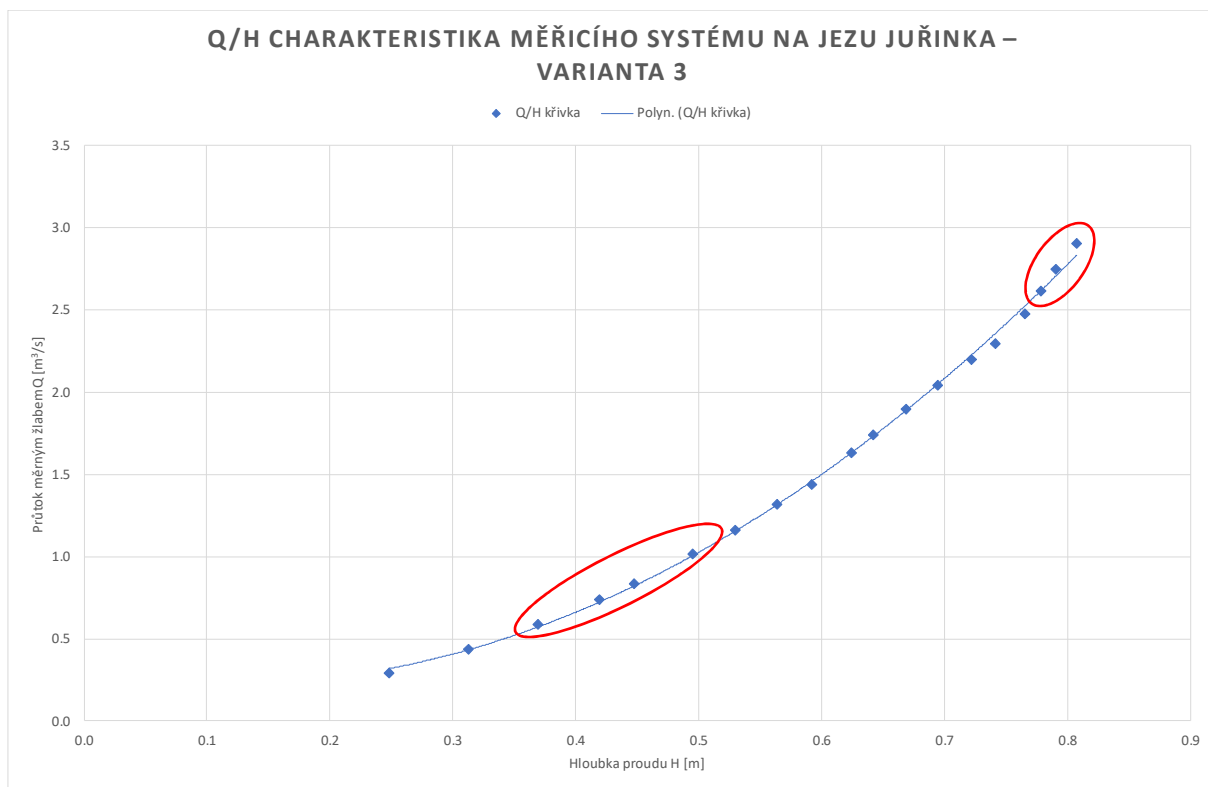
Mocninná funkce dobře vystihuje naměřené body při nižších průtocích. Z důvodu nepřesnosti proložení průtokových stavů nad $1 \text{ m}^3/\text{s}$ na díle však tato varianta byla shledána jako nepřijatelná. V Grafu 5.2 jsou naznačené body, které jsou nevhodně vystiženy touto spojnicí trendu.



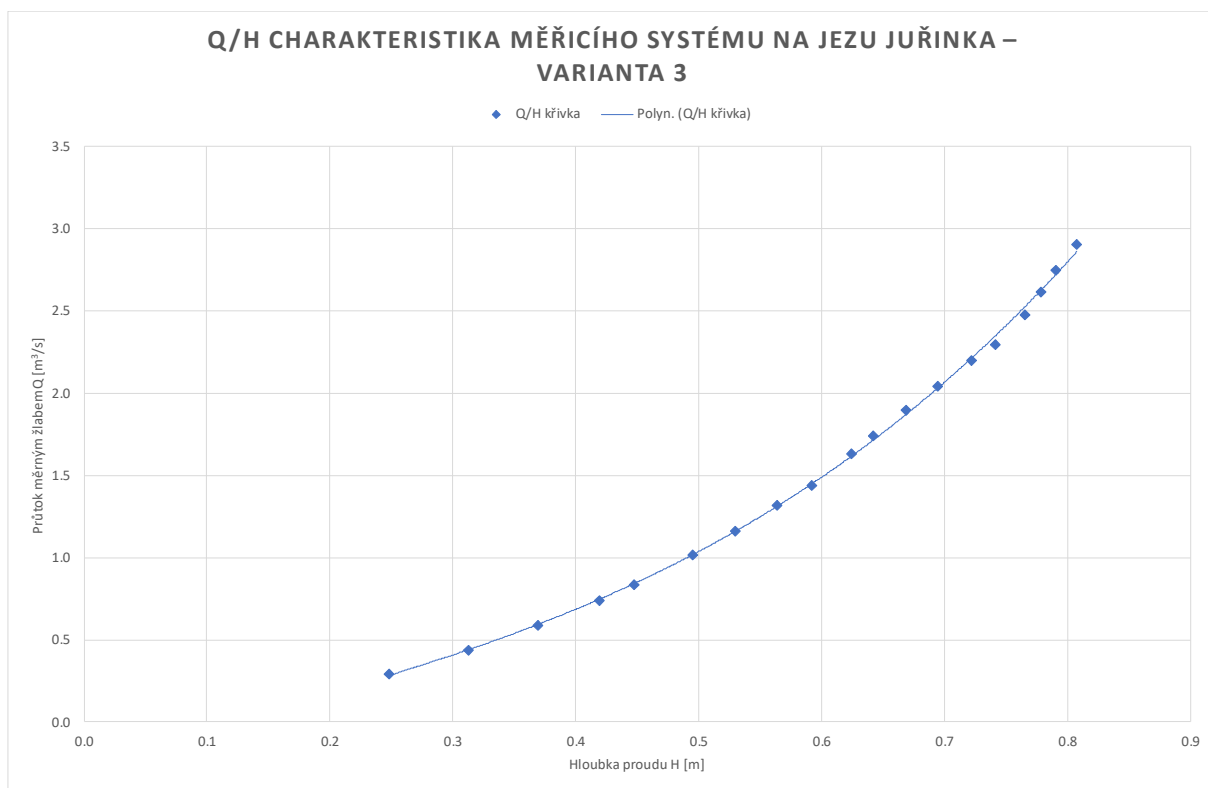
Graf 5.2 Nevhodné proložení měřených bodů mocninnou spojnicí trendu

Bylo rozhodnuto, že měřené body budou proloženy polynomicou funkcí. Naměřená data ve všech variantách bylo nejvhodnější proložit polynomicou spojnicí trendu třetího řádu. Ta je vystihuje lépe zejména v oblasti menších průtoků do $1 \text{ m}^3/\text{s}$ na díle než polynom druhého stupně. Na Grafu 5.3 je proložení bodů polynomicou spojnicí trendu druhého řádu s vyznačenými místy, kde jsou měřená data ne zcela dobře proložena. Dostatečně správné proložení měřených bodů je patrné na Grafu 5.4.

Stejný typ spojnice trendu byl použit také při proložení Q/E charakteristik.



Graf 5.3 Nevhodné proložení měřených dat polynomicou spojnicí trendu 2. řádu



Graf 5.4 Vhodné proložení měřených dat polynomicou spojnicí trendu 3. řádu

Po nalezení správné regresní křivky jí bylo možné proložit veškerá naměřená data na M 5,5 i M 8,5 a přiřadit ke každé variantě regresní koeficienty spojené s polynomem 3. řádu. Pomocí těchto koeficientů A , B , C , popisujících danou křivku, lze vypočítat regresní průtok Q_{reg} ve smyslu:

$$Q_{reg} = AH_{skut}^3 + BH_{skut}^2 + CH_{skut} \quad (5.10)$$

Regresní průtok Q_{reg} bude dále označován pouze jako Q . a hloubka hladiny na díle H_{skut} bude dále označována pouze jako H .

5.7 Výsledky měření

Měřená data u všech provedených měření byla zpracována a proložena polynomem třetího stupně popsáním regresními koeficienty, viz (kapitola 5.5 a 5.6) výše. Díky znalosti koeficientů a provedených výpočtů byly pro každou ze zkoumaných variant stanoveny příslušné Q/H a Q/E charakteristiky. V této podkapitole budou prezentovány výsledky experimentálních prací, jakožto srovnání jednotlivých variant na modelu M 5,5 a výběr zavazovacích křídel na modelu M 8,5.

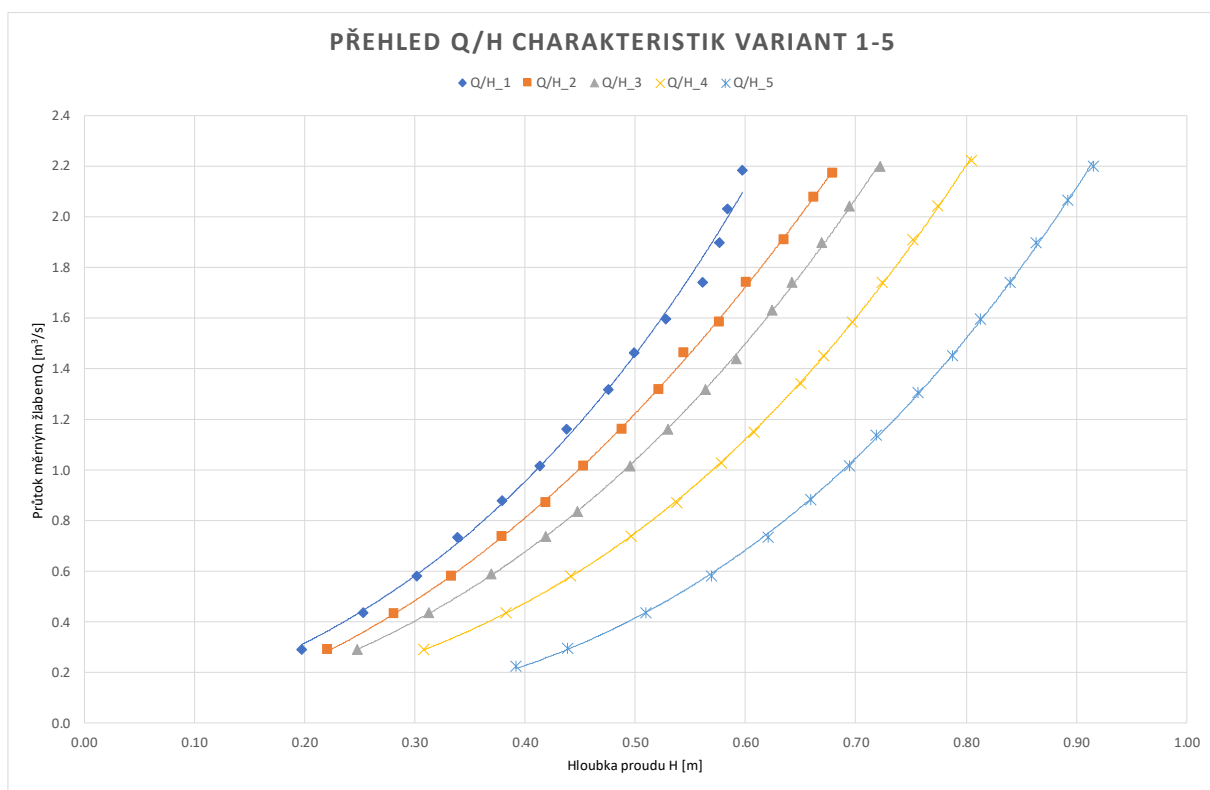
5.7.1 Výsledky experimentálních prací na modelu M 5,5

Účelem experimentálních prací na modelu M 5,5 bylo nalezení vhodné varianty atypického měrného žlabu. Pro každou ze zkoumaných variant V1 – V5 byly stanoveny příslušné Q/H charakteristiky, které jsou přehledně zobrazeny na Grafu 5.5.

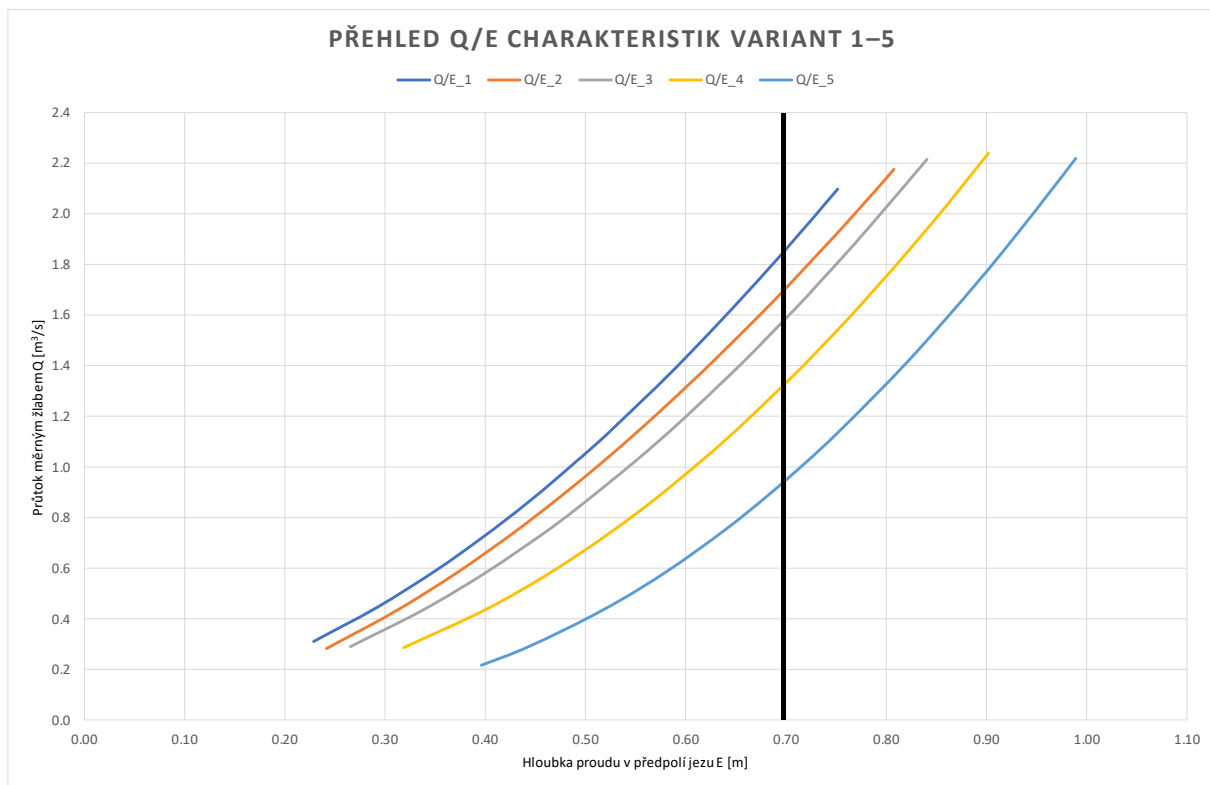
Vhodná varianta musela zaručit správnost měření v požadovaném rozsahu ($0,5 \text{ m}^3/\text{s} - 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$), co nejvíce využít disponibilní hloubku ($E = 0,7 \text{ m}$) a vyhovět okrajovým podmínkám realizovaným v předpolí jezové konstrukce. Z tohoto důvodu byly u všech měřených variant stanoveny také Q/E charakteristiky, přičemž hloubka proudu E nesměla při požadovaném průtoku $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ překročit disponibilní výškovou odlehlost. Srovnání příslušných Q/E charakteristik u všech zkoumaných variant lze vidět na Grafu 5.6. Pro jednoznačné srovnání průtoků u jednotlivých variant při plném využití hloubky $0,7 \text{ m}$ byla vytvořena Tabulka 5.3.

Tabulka 5.3 Srovnání průtoků při plném využití disponibilní hloubky u jednotlivých variant.

	V1	V2	V3	V4	V5
E [m]	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
Q [m^3/s]	1.880	1.723	1.599	1.337	0.950

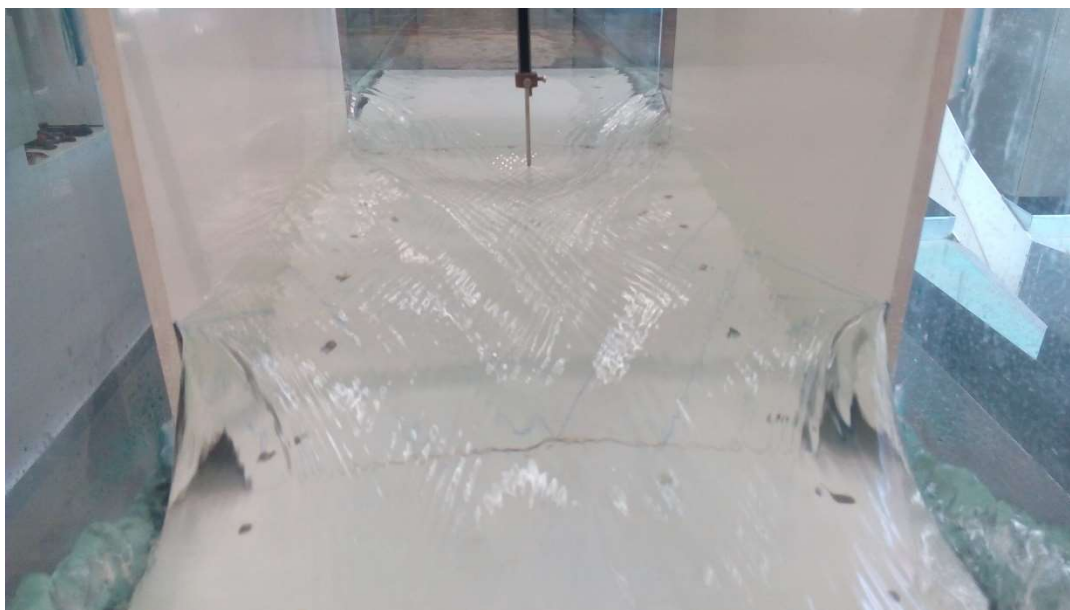


Graf 5.5 Přehled Q/H charakteristik jednotlivých konstrukčních variant atypického žlabu V1–V5



Graf 5.6 Přehled Q/E charakteristik jednotlivých konstrukčních variant atypického žlabu V1–V5

Z uvedeného grafu je patrné, že krajní varianty V1 a V5 jsou nevyhovující. Varianta V1 má příliš velkou průtokovou kapacitu a plně nevyužívá disponibilní hloubku 0,7 m (viz Tabulka 5.3). Z Grafu 5.5 jsou také zřejmé u průtoků nad 1,6 m³/s větší velikosti reziduí od proložené křivky, což je dáno počátkem přirozeného vzniku příčných vln na hladině viditelným na Obr. 5.16.



Obr. 5.16 Protiproudni pohled na příčné vlny u varianty V1 na modelu M 5,5 při průtoku 2,4 m³/s na díle

Varianta V5 má zase příliš malou průtočnou kapacitu a pro převedení požadovaného průtoku 1,5 m³/s by potřebovala výškovou odlehlost alespoň 0,85 m. Také varianta V4 nedisponuje dostatečnou průtočnou kapacitou a nehodí se tak pro požadované účely. Z Grafu 5.6 je pak zřejmé, že daným požadavkům nejvíce vyhovuje varianta V3.

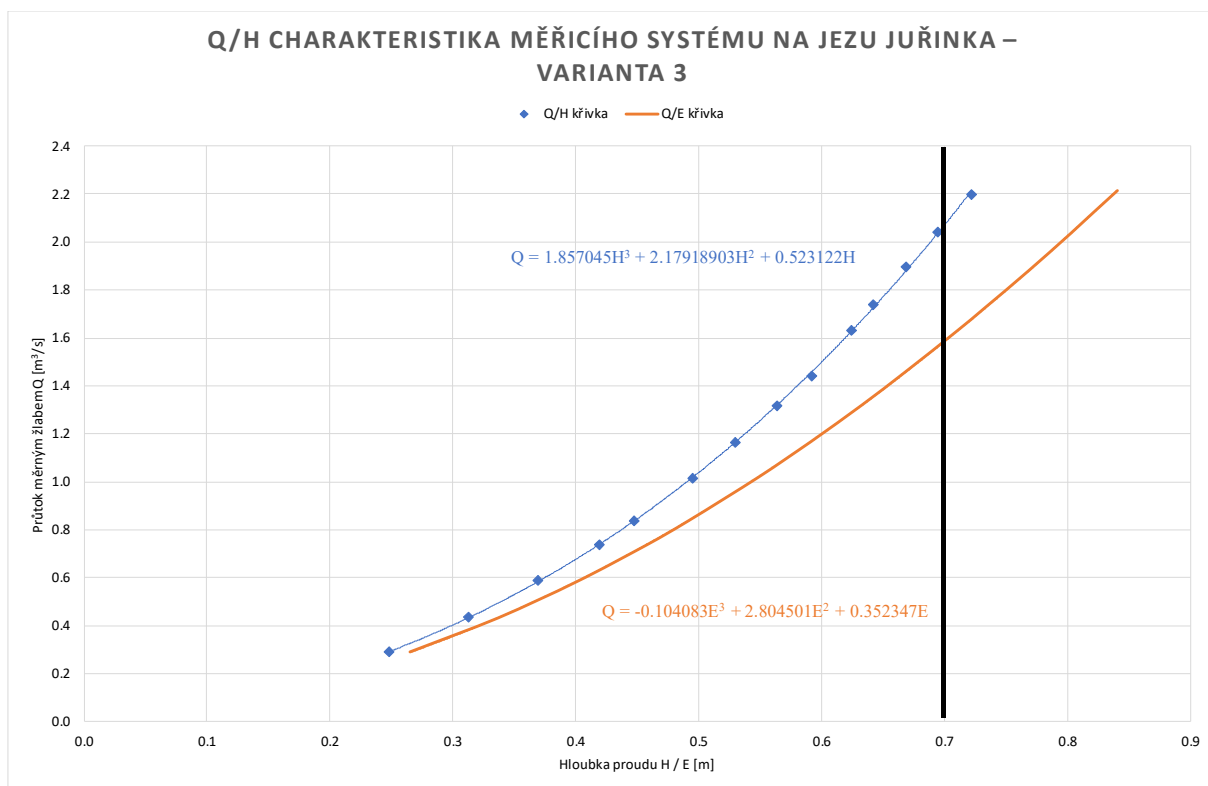
Varianta V3 byla tedy navržena k realizaci, jelikož nejvíce využívá disponibilní hloubku pro převedení požadovaného průtoku, což je zřetelné jak z Grafu 5.6, tak z tabulky 5.3. Při hloubce $E = 0,7$ m lze předpokládat průtok ve žlabu kolem 1,6 m³/s. Jelikož se jedná o variantu vhodnou k realizaci, na Grafu 5.7 jsou vyneseny obě Q/H a Q/E charakteristiky se zaznačením disponibilní hloubky 0,7 m a také s příslušnými vztahy odpovídajícím regresním funkcím. Tyto vztahy jsou ve smyslu rovnice (5.10):

$$Q = 1,857H^3 + 2,179H^2 + 0,523H, \quad (5.11)$$

$$Q = -0,104E^3 + 2,805E^2 + 0,352E. \quad (5.12)$$

Měřicí rozsah takto navrženého atypického měrného žlabu je 0,3 m³/s – 1,6 m³/s, čímž splňuje požadavky objednatele. Pro úplnost jsou hodnoty Q/H charakteristiky ve výše uvedeném měřicím rozsahu uvedeny také v Tabulce 5.4. Tímto měřicím systémem je možné

měřit i nižší hodnoty průtoků, než je 0,3 m³/s za pomoci extrapolace uvedených křivek, ale takto stanovené průtoky mají nižší úroveň přesnosti.



Graf 5.7 Q/H a Q/E charakteristiky varianty V3 s vyznačenou hloubkou 0,7 m

Takto stanovená Q/H charakteristika má na 95 % hladině spolehlivosti celkovou nejistotu nižší, než $\pm 2 \%$ [15]. Q/H charakteristika odpovídá dokonalému průtoku měrným žlabem. Tento stav, kdy měřicí systém není ovlivněn úrovní dolní vody je v měrném místě při sledovaných průtocích zaručen.

Tabulka 5.4 hodnoty Q/H charakteristiky pro variantu V3.

i	H	Q
[-]	[m]	[m ³ /s]
1	0.25	0.296
2	0.26	0.316
3	0.28	0.358
4	0.3	0.403
5	0.32	0.451
6	0.34	0.503
7	0.36	0.557
8	0.38	0.615
9	0.4	0.677

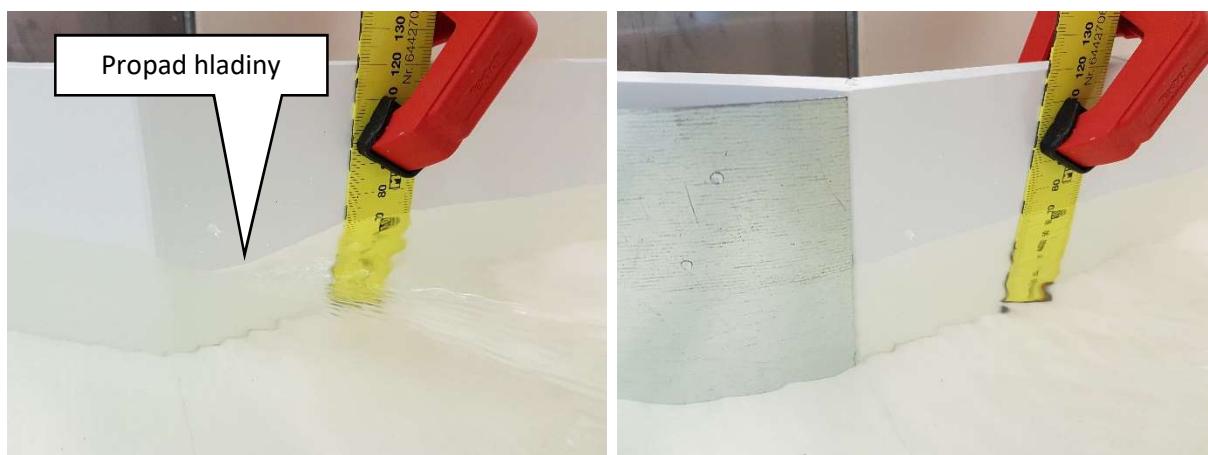
i	H	Q
[-]	[m]	[m ³ /s]
10	0.42	0.742
11	0.44	0.810
12	0.46	0.883
13	0.48	0.959
14	0.5	1.038
15	0.52	1.122
16	0.54	1.210
17	0.56	1.302
18	0.58	1.399
19	0.6	1.500
20	0.62	1.605

5.7.2 Výsledky experimentálních prací na modelu M 8,5

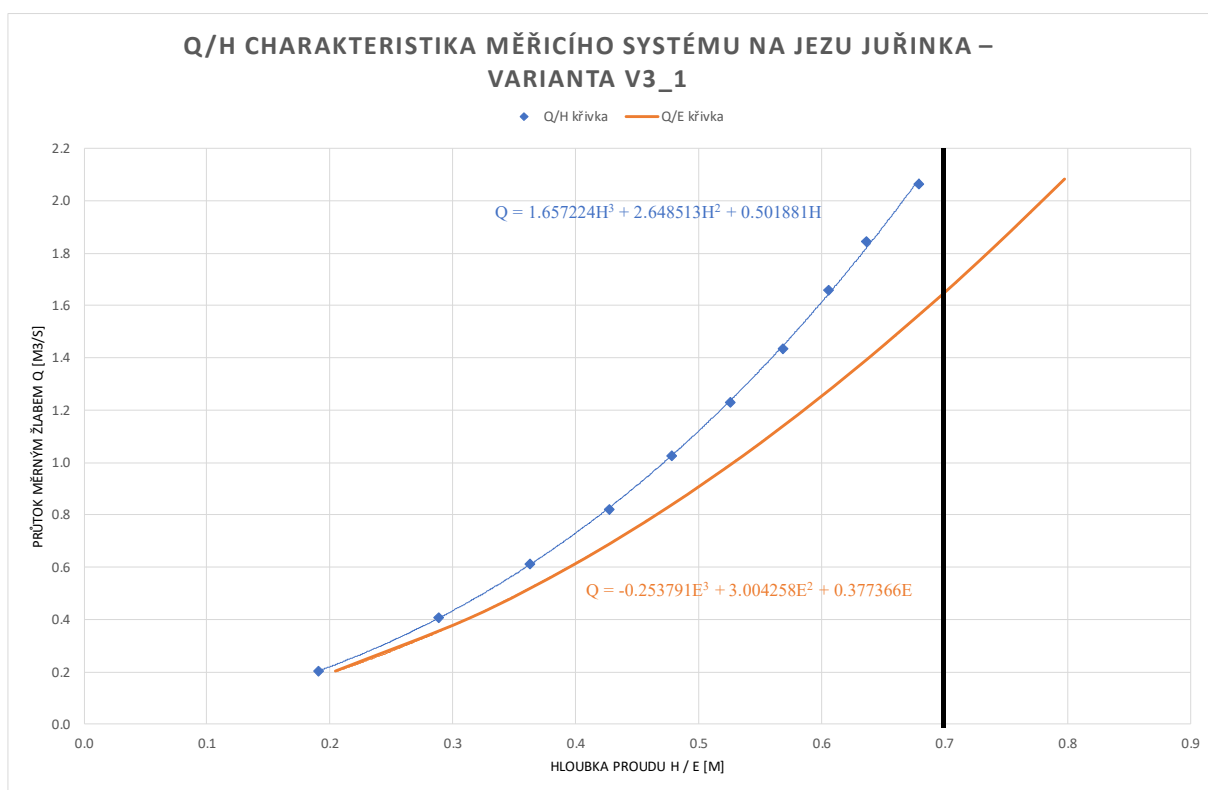
Na menším modelu M 8,5 byla pro další experimentální práce realizována pouze nejvhodnější námi navržená varianta V3. Cílem prací na tomto modelu byl výběr vhodné úpravy tvaru a rozměrů zavazovacích křídel, díky které by se předešlo vzniku křížové vlny ovlivňující rovinnost hladiny a tím i přesnost měření hloubky proudu v profilu 2 m protiproudě před koncem hrdla žlabu.

Bylo zjištěno, že tento vznik křížové vlny lze pozorovat poproudě od místa napojení zavazovacího křídla na prizmatickou část žlabu při průtoku 1,5 m³/s na díle. Z tohoto důvodu bylo třeba nahradit v půdorysu přímá zavazovací křídla patrná z Obr. 5.10 konstrukcí tvořenou kruhovým obloukem tak, aby se co nejvíce zamezilo vzniku křížové vlny. Pro tyto účely byly zkoumány varianty s označením V3_1 a V3_2, které byly podrobně popsány v kapitole 5.2.2.

Jelikož obě zkoumané varianty V3_1 i V3_2 dokázaly zamezit vzniku křížové vlny, k realizaci byla nakonec vybrána první varianta z důvodu kratších a úspornějších zavazovacích křídel. Na Obr. 5.17 lze vidět vznik křížové vlny a tím daný propad hladiny u přímých zavazovacích pilířů a stav hladiny po instalaci vybrané varianty. Pro zvolenou variantu V3_1 byly zpracovány Q/H i E/H charakteristiky, které lze vidět na Grafu 5.8 včetně jejich popisujících regresních rovnic.



Obr. 5.17 Popravní pohled na zavazovací křídla. Zleva přímé zavazovací křídlo, kruhové ve variantě V3_1



Graf 5.8 Q/H a E/H charakteristiky instalované varianty V3_1 na modelu M 8,5

Z uvedeného grafu je patrné, že Q/H a E/H charakteristiky nejsou shodné s výsledky na modelu M 5,5 (Graf 5.7). Tento fakt lze vysvětlit především možným vlivem povrchového napětí při měření na menším modelu M 8,5. Zmenšení je již výrazné a dosažení úplné geometrické shody mezi modely je v tomto případě taktéž komplikovanou záležitostí. Vzhledem k tomu, že model byl určen především pro nalezení rozměrů a tvaru zavazovacích křídel nebylo s dosaženými charakteristikami dále pracováno. Pro úplnost však byla vytvořena

Tabulka 5.5, ve které jsou hodnoty Q/H charakteristik varianty V3 měřené na modelu M 5,5 a varianty V3_1 měřené na modelu M 8,5. V této tabulce je zřejmé srovnání výsledků měření na obou modelech a jejich odchylka, která byla vypočtena ve smyslu rovnice (5.7).

Tabulka 5.5 Srovnání Q/H charakteristik určených na modelu M 5,5 a M 8,5 pro varianty V3 a V3_1

i	H	M 5,5 - V3	M 8,5 - V3_1	δ
		Q	Q	
[-]	[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]
1	0.25	0.296	0.317	6.60
2	0.26	0.316	0.339	6.70
3	0.28	0.358	0.385	6.88
4	0.3	0.403	0.434	7.03
5	0.32	0.451	0.486	7.14
6	0.34	0.503	0.542	7.23
7	0.36	0.557	0.601	7.29
8	0.38	0.615	0.664	7.34
9	0.4	0.677	0.731	7.37
10	0.42	0.742	0.801	7.38
11	0.44	0.810	0.875	7.37
12	0.46	0.883	0.953	7.36
13	0.48	0.959	1.034	7.33
14	0.5	1.038	1.120	7.30
15	0.52	1.122	1.210	7.25
16	0.54	1.210	1.304	7.20
17	0.56	1.302	1.403	7.14
18	0.58	1.399	1.505	7.08
19	0.6	1.500	1.613	7.01
20	0.62	1.605	1.724	6.94

Součástí experimentálních prací na menším modelu bylo také určení součinitele místních ztrát ζ . Při šesti průtokových stavech byl proveden výpočet tohoto součinitele ve smyslu rovnice (5.9). V Tabulce 5.6 je uveden přehled výsledků při jednotlivých průtokových stavech. Vzhledem k variabilitě těchto výsledků byl nakonec součinitel místních ztrát ζ uvažován s bezpečnou hodnotou 0,04, což odpovídá i hodnotám uváděným v [15].

Tabulka 5.6 Přehled výsledků součinitele místních ztrát

Q	H _{0skut}	H	ζ
[m ³ /s]	[m]	[m]	[-]
0.203	0.209	0.190	0.701
1.236	0.574	0.526	0.032
1.447	0.627	0.569	0.041
1.643	0.669	0.605	0.017
1.821	0.710	0.637	0.032
2.663	0.852	0.763	-0.110

5.8 Shrnutí a diskuze dosažených výsledků

Po provedení rozsáhlých experimentálních prací zahrnujících měření a zpracování dat bylo dosaženo výsledků, které budou v následujících odstavcích shrnuty.

Na modelu M 5,5 byla pro každou konstrukční variantu stanovena Q/H charakteristika. Všechny takto stanovené Q/H charakteristiky bylo možné s dostatečnou shodou proložit polynomicou funkcí třetího řádu, což odpovídá standardním požadavkům kladeným TNV 25 9305 [6]. U jednotlivých zkoumaných variant byly zohledněny okrajové podmínky a byla určena hloubka proudu E , která se realizuje v předpolí jezu. Tato hloubka nesměla překročit 0,7 m výškové odlehlosti mezi úrovní dna v místě hrdla žlabu a úrovní přelivné hrany jezového stupně při průtoku 1,5 m³/s.

Na základě tohoto faktu byly vyloučeny dvě zkoumané varianty. Jednalo se o varianty V4 a V5, které byly vyloučeny z důvodu nízké průtočné kapacity, kdy nebyl dodržen požadovaný měřicí rozsah 0,5 m³/s – 1,5 m³/s při disponibilní hloubce 0,7 m. Krajní varianta V1 byla naopak vyloučena z důvodu příliš velkého průtočného průřezu. Varianty V2 a V3 splňovaly oba výše uvedené požadavky. Z grafických vyjádření je však zjevné, že varianta V3 je pro návrh vhodnější, jelikož při měření v požadovaném měřicím rozsahu využívá téměř celou disponibilní hloubku.

Námi stanovené výsledky experimentálních prací na modelu M 5,5 potvrdily počáteční odhad, kdy se právě o variantě V3 uvažovalo jako o vhodné.

Na modelu M 8,5 byla dále zkoumána vybraná varianta V3. Na tomto menším modelu byl určen tvar zavazovacích křídel a jejich velikost. Úprava zavazovacích křídel byla nutná z důvodu potlačení vzniku příčné (křížové) vlny s přímými zavazovacími křídly v profilu měření hloubky proudu při vyšších průtocích. Obě zkoumané varianty zavazovacích křídel V3_1 a V3_2 splnily svůj účel a vznik křížové vlny potlačily. Vybrána byla varianta V3_1, jelikož je kratší než varianta V3_2.

Po určení vhodné varianty zavazovacích křídel pro ni byla na modelu M 8,5 stanovena Q/H charakteristika. Při porovnání výsledků variant V3 a V3_1 získaných na obou modelech byla zřejmá odchylka okolo 7 %, což ukazuje na možný vliv povrchového napětí při nižších průtocích na menším modelu.

Závěrem experimentálních prací na menším modelu bylo určení součinitele místních ztrát ζ . Ten byl určen na základě naměřených hodnot ve výši 0,04.

6 DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ VÝZKUM

Jak je uvedeno v předchozích kapitolách, návrhem a následným výzkumem atypických žlabů lze vyhovět specifickým požadavkům na měřicí systém v profilech s volnou hladinou. Atypické měrné žlaby jsou vždy unikátní, proto nemohou být nikdy normalizovány a návrhy těchto žlabů budou muset být podrobeny vždy výzkumným pracím. Tento fakt a perspektiva častějších období sucha v budoucnosti mohou být impulsem pro zkoumání dalších atypických měrných žlabů s jinými okrajovými podmínkami v prostorách Laboratoře vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.

V praxi mohou být také použity varianty rovinných prvků, které byly zkoumány, ale nebyly navrženy k realizaci. Tyto varianty mohou vyhovovat případným požadavkům na měřicí systém na jiném místě. Doporučený je i další výzkum atypického měrného žlabu zkoumaného v této bakalářské práci. Námi navržený žlab má poměr výšky ku jeho šířce (H/B) 1:3, je však možné provést výzkum tohoto žlabu i v jiném poměru H/B . Pro tyto účely byl již koncipován i model M 5,5 s variantou poměru výšky žlabu ku jeho šířce 1:2.

V prostoru zkoumaného podjezí je zaručen při měřicím rozsahu atypického měrného žlabu dokonalý průtok tímto systémem, tedy bez ovlivnění úrovně hladiny dolní vody. Tento měřicí systém však může být instalován i do prostorů, kde geometrické okrajové podmínky nezaručí dokonalé neovlivněné proudění. Pro další výzkum je tak doporučeno měření v podmínkách ovlivnění úrovně hladiny dolní vody, kdy by se výzkum zkoumaných variant rozšířil o stanovení speciální úplné průtokové charakteristiky, která by zaručila správnost měření atypického měrného žlabu i v podmínkách nedokonalého proudění.

7 ZÁVĚR

V rámci této bakalářské práce byly provedeny experimentální práce vedoucí k návrhu atypického měrného žlabu a stanovení Q/H charakteristiky. Při těchto pracích bylo dbáno na dodržení požadavků objednatele. Pro tyto účely byly v prostorách Laboratoře vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně navrženy dva fyzikální modely.

Na větším modelu s označením M 5,5 bylo zkoumáno pět variant tvarů a rozměrů vzdouvací nerezové konstrukce. Pro každou variantu byla stanovena příslušná Q/H charakteristika, která byla pro dílo charakterizována matematicky regresní funkcí. Nejvhodnější variantou se po vyhodnocení ukázala ta s označením V3.

Na menším modelu M 8,5 byla nalezena vhodná úprava tvaru vtokových usměřňovacích pilířů, která nese označení V3_1. Pro úplnost byla i pro tuto variantu na menším modelu stanovena Q/H charakteristika.

Rozsáhlé experimentální práce lze považovat za úspěšné. Navržený atypický měrný žlab splňuje veškeré požadavky objednatele. Součástí této bakalářské práce je také doporučení pro další výzkum.

8 LITERATURA

- [1] ČSN ISO EN 772: *Hydrometrická měření – Terminologie*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [2] *Open Channel Hydraulics* [online]. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2006 [cit. 2019-03-23]. ISBN 9780750668576. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9780750668576/open-channel-hydraulics>
- [3] MATTAS, Daniel. *Výpočet průtoku v otevřených korytech* [online]. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka, 2014 [cit. 2019-03-23]. ISBN 978-80-87402-27-6. Dostupné z: https://www.vuv.cz/files/pdf/edicni_cinnost/publikace/mattas_vypocet_prutoku.pdf
- [4] JANDORA, Jan a Jan ŠULC. *Hydraulika: modul 01*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. ISBN 978-80-7204-512-9.
- [5] BOOR, Boris, Cyril PATOČKA a Jiří KUNŠTÁTSKÝ. *Hydraulika pro vodohospodářské stavby: celost. učebnice pro vys. školy*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1968. Řada stavební literatury.
- [6] ŽOUŽELA, Michal a Jan ŠULC. *Návrh TNV 25 9305 s pracovním komentářem autorů: Měřicí systémy proteklého objemu vody v profilech s volnou hladinou. Technické, metrologické a provozní požadavky na pracovní měřidla a posuzování jejich funkční způsobilosti*. Brno, 2012.
- [7] *Metrologický předpis MP 010: Úřední měření průtoku vody v profilech s volnou hladinou*. In: Brno: Český metrologický institut, 2018. Dostupné také z: https://www.cmi.cz/sites/all/files/public/download/MP%20010_2018_web.pdf
- [8] *TNV 25 9305: Měřicí systémy proteklého objemu vody v profilech s volnou hladinou*. Praha: Hydroprojekt CZ, 2012.
- [9] *PARS aqua s.r.o.* [online]. [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <http://www.pars-aqua.cz/clanek.html>
- [10] ČSN ISO 1438: *Hydrometrie - Měření průtoku vody v otevřených korytech pomocí tenkostěnných přelivů*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [11] HERSHEY, Reginald W. *Streamflow measurement*. 3rd ed. New York: Routledge, 2009. ISBN 02-039-3139-4.

- [12] ČSN ISO 9826: Měření průtoku kapalin v otevřených korytech Parshallovy žlaby a žlaby typu SaniiriI. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [13] HLAVÍNEK, Petr, Jan MIČÍN, Petr PRAX, Petr HLUŠTÍK a Radim MIFEK. *Stokování a čištění odpadních vod: Modul 1, STOKOVÁNÍ*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2535-0.
- [14] Laboratoř vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně: LVV [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.fce.vutbr.cz/vst/lvv/index.html>
- [15] Žoužela, M.: Návrh a fyzikální modelový výzkum měrného žlabu určeného pro stanovení minimálních zůstatkových průtoků v profilu jezu Jiřinka I na řece Bečvě v říčním km 59,7. Výzkumná zpráva, LVV – FAST – VUT v Brně, 2018
- [16] ČÁBELKA, Jaroslav a Pavel NOVÁK. *Hydrotechnický výzkum*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964. Česká matice technická (SNTL).

9 SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

SEZNAM SYMBOLŮ:

Označení	Popis	Jednotka
A, B, C	Hodnoty regresních koeficientů	[–]
b	Šířka přelivné hrany	[m]
B_k	Šířka koryta v hladině	[m]
E	Energetická výška	[m]
E_R^{RELAT}	Relativní chyba měření	[%]
f	funkční závislost	[–]
Fr	Froudovo číslo	[–]
g	Gravitační zrychlení	[m/s ²]
h	Výška	[m]
H	Hloubka	[m]
$H_{0,skut}$	Hloubka proudu před měrným žlabem	[m]
H_{max}	Maximální měřitelná hloubka	[m]
$H_{měř}$	Měřená hloubka proudu	[mm]
H_{min}	Minimální měřitelná hloubka	[m]
H_{skut}	Hloubka proudu na díle	[m]
m	Bazinův přepadový součinitel	[–]
M 5,5	Model v měřítku délek 1:5,545	[–]
M 8,5	Model v měřítku délek 1:8,392	[–]
p	Tlak	[Pa]
Q	Průtok	[m ³ /s]
$Q_{měř}$	Měřený průtok	[l/s]
Q_{kor}	Průtok korigovaný kalibrací	[m ³ /s]
Q_{reg}	Regresní průtok	[m ³ /s]
Q_{skut}	Průtok na díle	[m ³ /s]
R	Hydraulický poloměr	[m]
Re	Reynoldsovo kritérium	[–]
s	Výška přepadové hrany	[m]
S	Plocha	[m ²]
t	Tloušťka přelivné stěny	[m]
t	Čas	[s]

u	Bodová rychlost	[m/s]
v	Střední rychlost proudění	[m/s]
V	Objem vody	[m ³]
V1 – V5	Varianty rovinných prvků vzdouvací kce.	[–]
V3_1 – V3_2	Varianty obloukových zavazovacích křídel	[–]
y	Úroveň hladiny	[m]
y_k	Kritická hloubka	[m]
α	Coriolisovo číslo	[–]
δ_i	Odchylka	[%]
ζ	Součinitel místních ztrát	[–]
μ	Přepadový součinitel	[–]
ν	Kinematická viskozita kapaliny	[–]
ρ	Hustota kapaliny	[kg/m ³]

SEZNAM ZKRATEK:

ČOV	Čistírna odpadních vod
ČR	Česká republika
DN	Vnitřní průměr potrubí

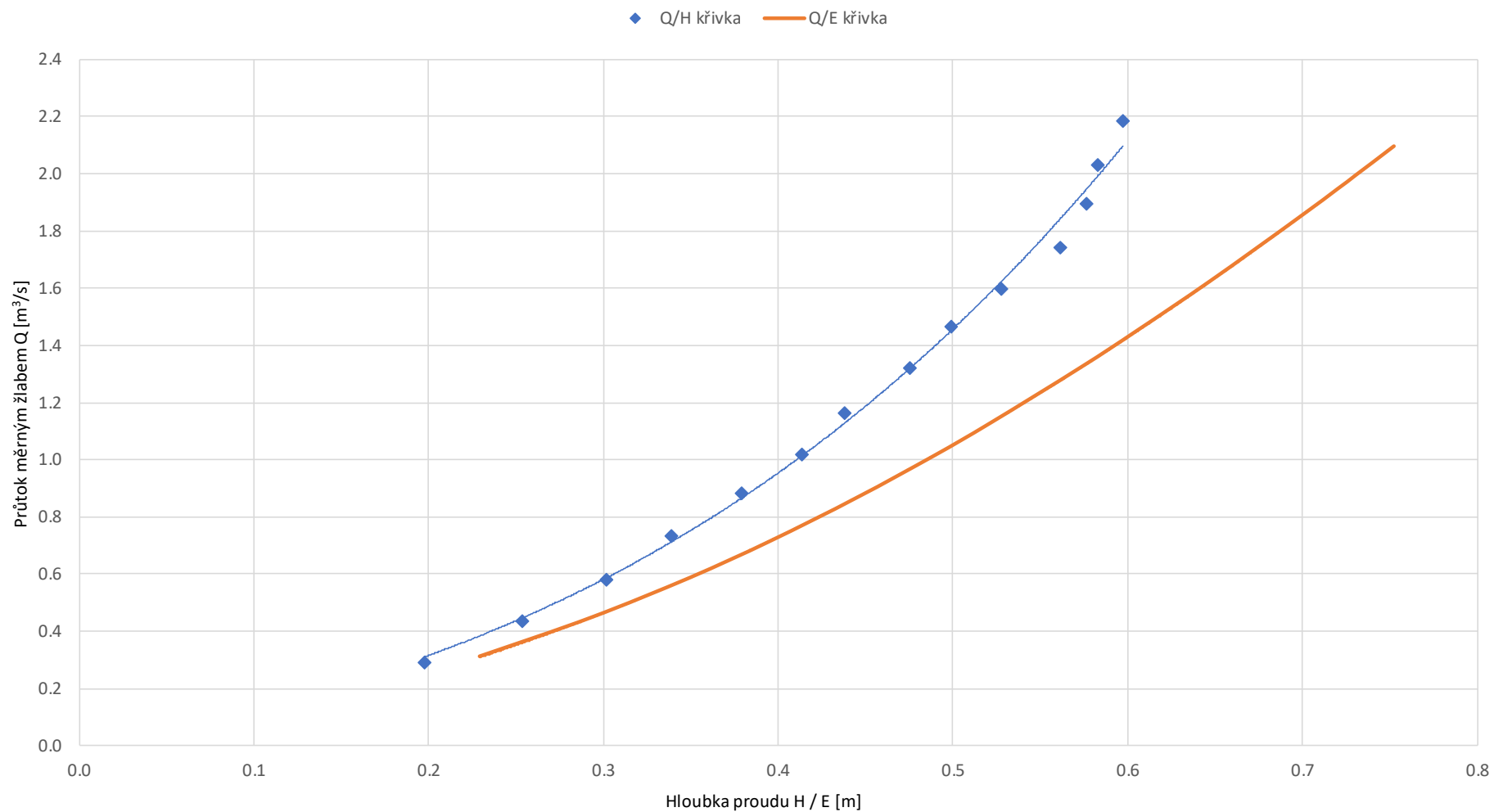
10 SEZNAM PŘÍLOH

Grafické zpracování naměřených dat

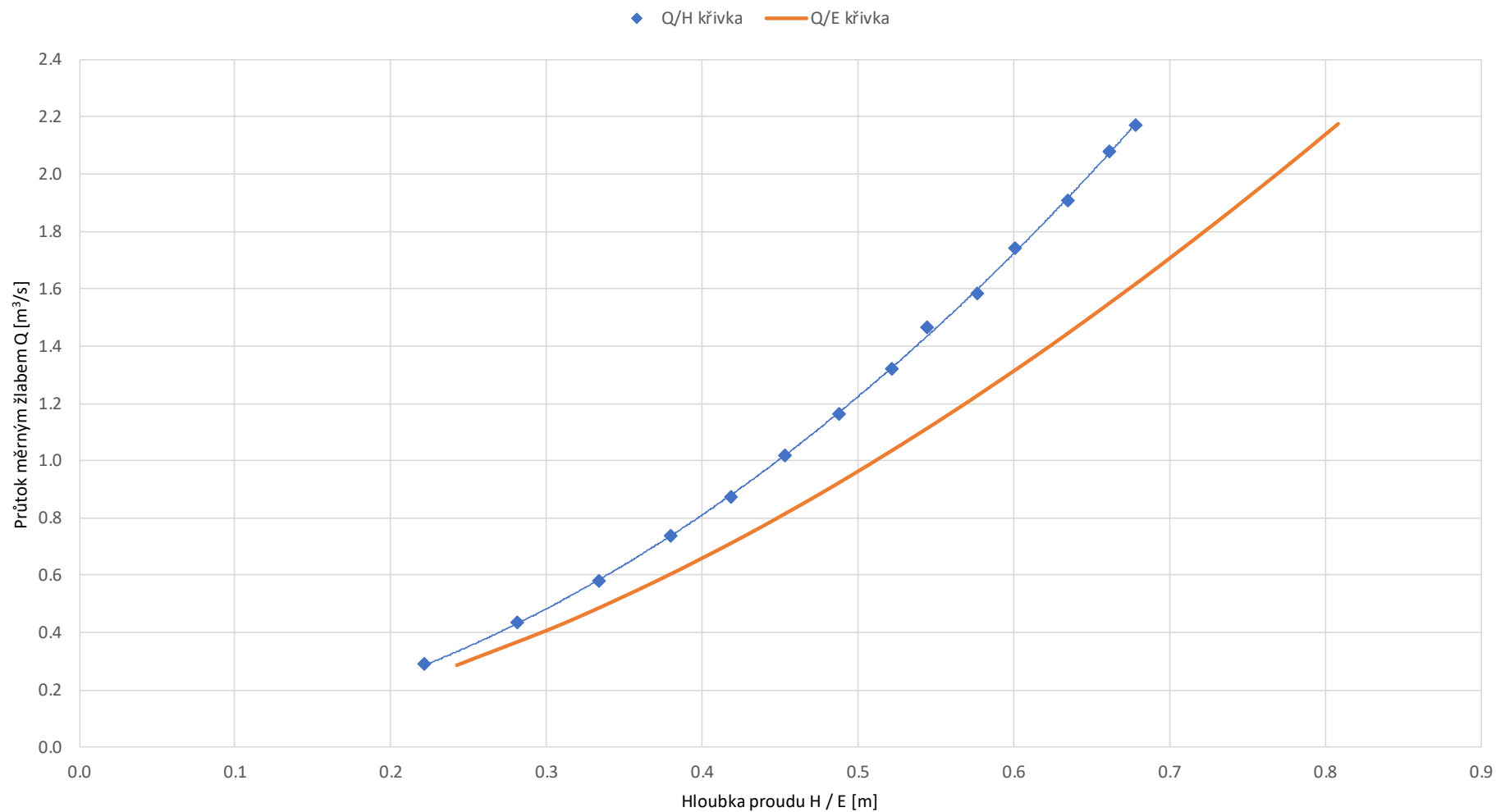
P1	Q/H charakteristika měřicího systému na jezu Juřinka – varianta 1
P2	Q/H charakteristika měřicího systému na jezu Juřinka – varianta 2
P3	Q/H charakteristika měřicího systému na jezu Juřinka – varianta 3
P4	Q/H charakteristika měřicího systému na jezu Juřinka – varianta 4
P5	Q/H charakteristika měřicího systému na jezu Juřinka – varianta 5
P6	Q/H charakteristika měřicího systému na jezu Juřinka – varianta V3_1
P7	Přehled Q/H charakteristik variant V1-V5
P8	Přehled Q/E charakteristik variant V1-V5
P9	Srovnání Q/H charakteristik měřicího systému na jezu Juřinka – varianty V3–V3_1

PŘÍLOHOVÁ ČÁST

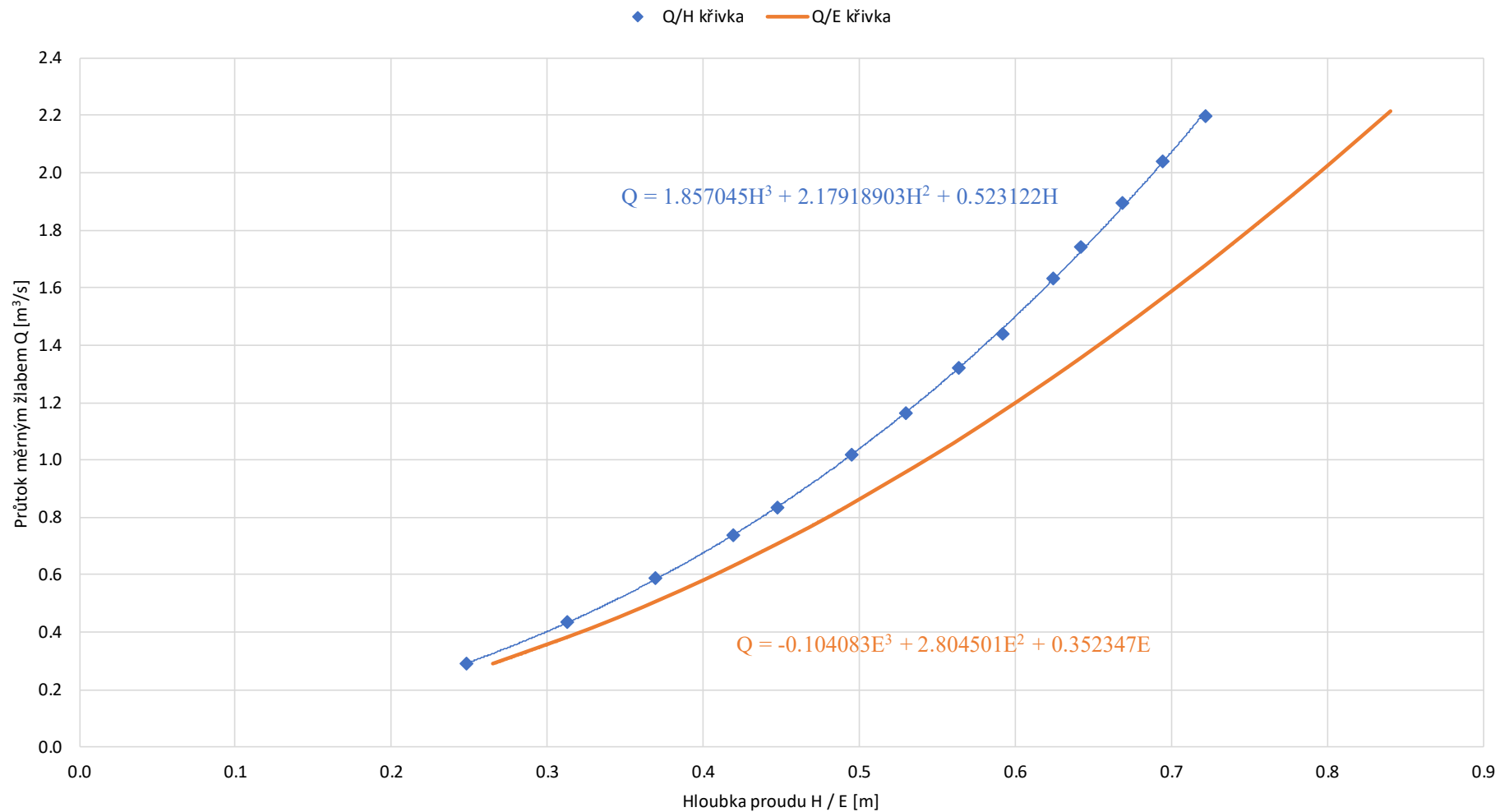
P1
Q/H CHARAKTERISTIKA MĚŘICÍHO SYSTÉMU NA JEZU JUŘINKA –
VARIANTA 1



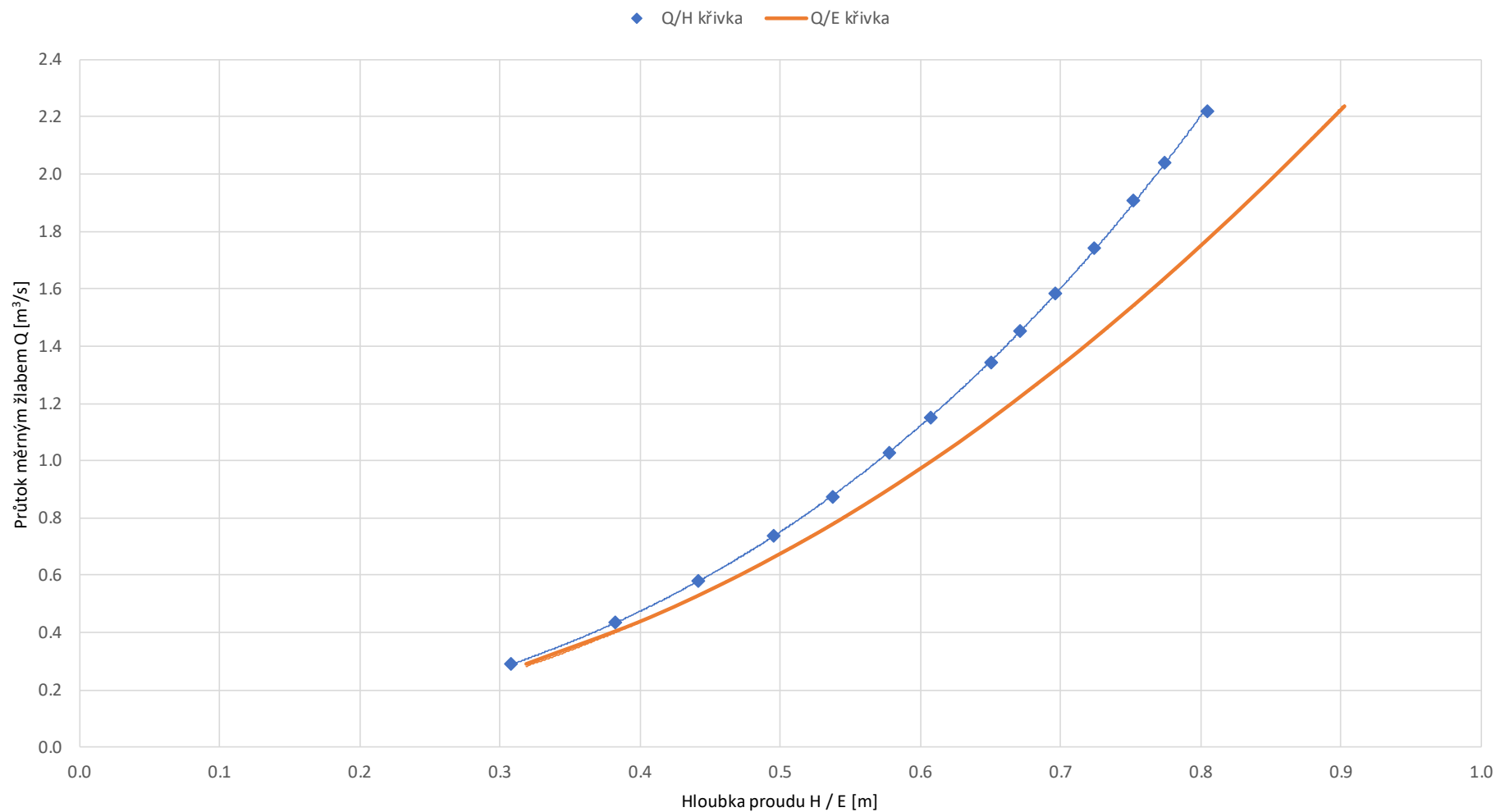
P2
Q/H CHARAKTERISTIKA MĚŘICÍHO SYSTÉMU NA JEZU JUŘINKA –
VARIANTA 2



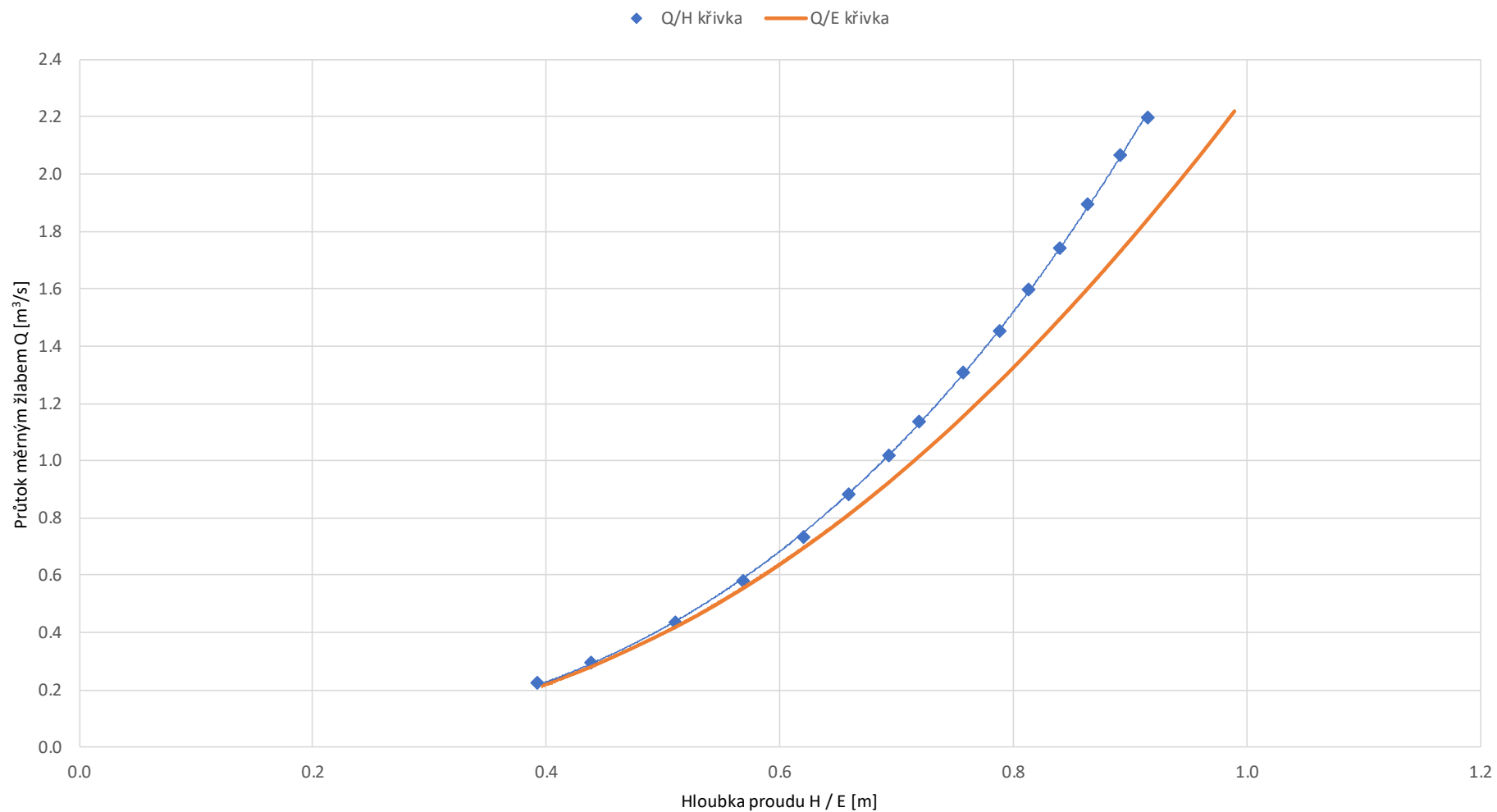
P3
Q/H CHARAKTERISTIKA MĚŘICÍHO SYSTÉMU NA JEZU JUŘINKA –
VARIANTA 3



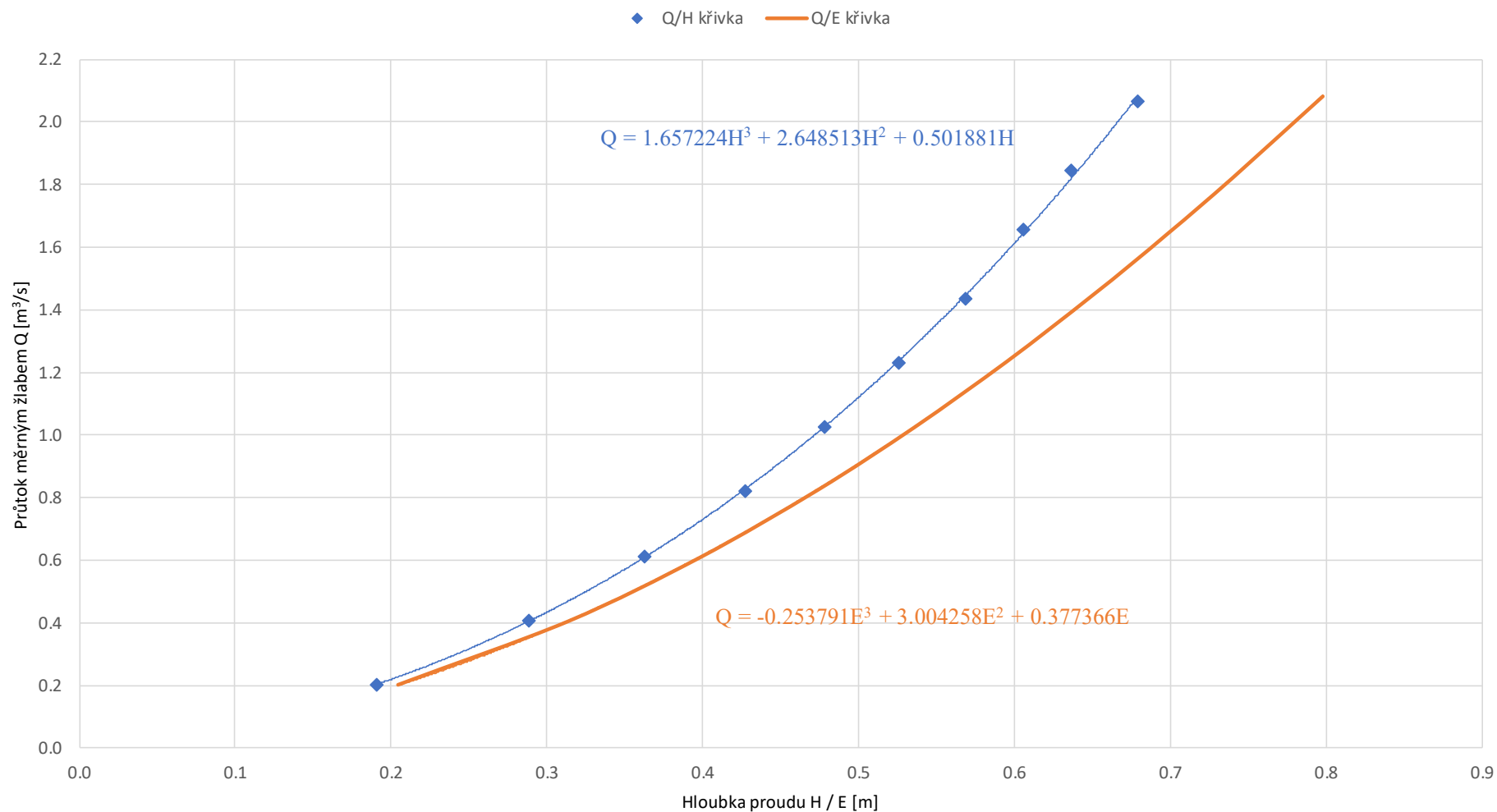
P4
Q/H CHARAKTERISTIKA MĚŘICÍHO SYSTÉMU NA JEZU JUŘINKA –
VARIANTA 4



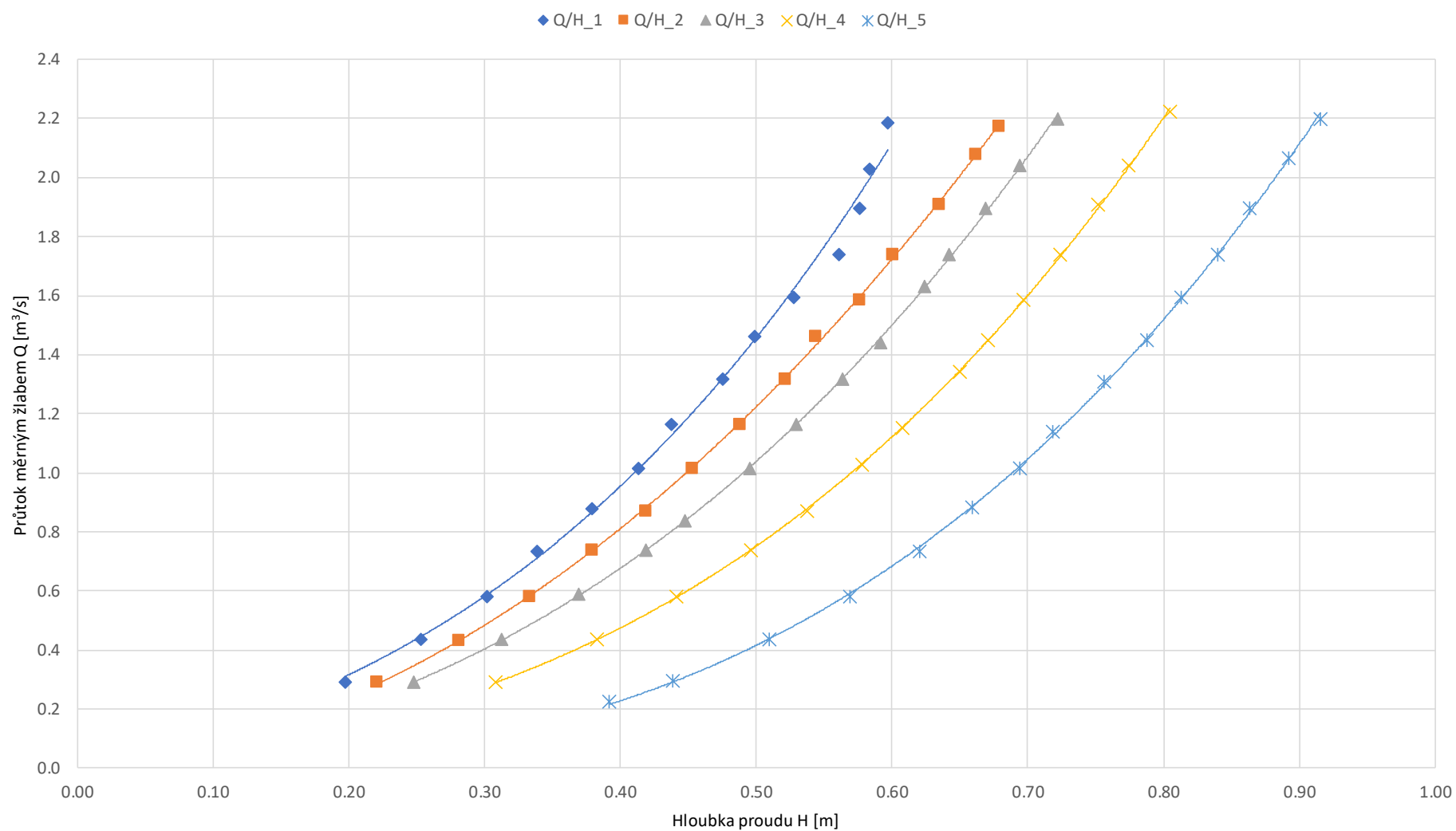
P5
Q/H CHARAKTERISTIKA MĚŘICÍHO SYSTÉMU NA JEZU JUŘINKA –
VARIANTA 5



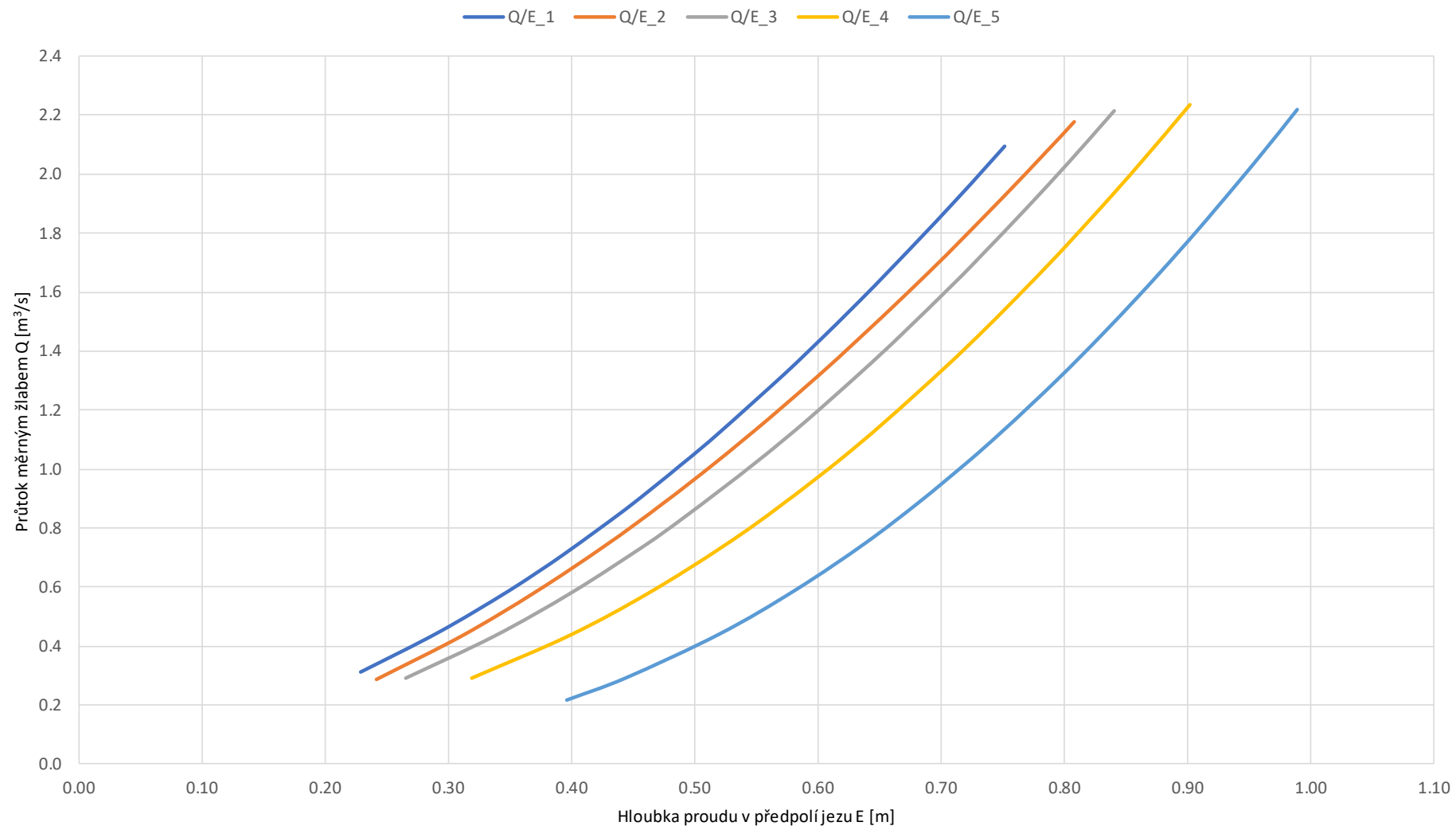
P6
Q/H CHARAKTERISTIKA MĚŘICÍHO SYSTÉMU NA JEZU JUŘINKA –
VARIANTA V3_1



P7
PŘEHLED Q/H CHARAKTERISTIK VARIANT 1–5



P8
PŘEHLED Q/E CHARAKTERISTIK VARIANT 1–5



P9
SROVNÁNÍ Q/H CHARAKTERISTIK MĚŘICÍHO SYSTÉMU NA JEZU JUŘINKA –
VARIANTY V3–V3_1

